

THESIS

MUNICH

1967

DIE BEOBACHTUNG
DER STIMMLIPPENBEWEGUNGEN
MITTELS DER GLOTTOGRAPHIE

Horst Bürger

LANE MEDICAL LIBRARY OF
STANFORD UNIVERSITY
210 PASTEUR
PALO ALTO, CALIFORNIA

AUS DER HALS-, NASEN- UND OHRENKLINIK
DER UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Direktor: Prof. Dr. A. Herrmann

DIE BEOBACHTUNG
DER STIMMLIPPENBEWEGUNGEN
MITTELS DER GLOTTOGRAPHIE

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde in der gesamten Medizin
verfaßt und
einer Hohen Medizinischen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von
Horst Bürger
aus Augsburg

München 1967

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

Berichterstatter:	Dr. E. LOEBELL
Mitberichterstatter:	Prof. Dr. A. HERRMANN
Dekan:	Prof. Dr. M. KIESE

Tag der mündlichen Prüfung: 14. 2. 1967

MEINER LIEBEN MUTTER
IN DANKBARKEIT GEWIDMET



Digitized by the Internet Archive
in 2026

GESCHICHTE DER KEHLKOPFUNTERSUCHUNG

ANATOMIE DES KEHLKOPFES

- Knorpel
- Gelenke
- Muskeln
- Innervation

PHYSIOLOGIE DES KEHLKOPFES

- Schwingungen der Stimmlippen
- Bruststimme
- Kopfstimme

UNTERSUCHUNGEN VON FABRE

UNTERSUCHUNGSMETHODEN

- Glottographie
- Kathodenstrahloszillograph
- Phonographie

ERGEBNISSE VON FABRE

- Bruststimme
- Fistelstimme
- Nachsingen eines Tones
- Stimmeinsatz
- Klonus und Tonus der Kehlkopfmuskeln

EIGENE UNTERSUCHUNGEN

UNTERSUCHUNGSMETHODEN

- Glottographie
- Kathodenstrahloszillograph
- Photographische Aufzeichnung
- Filmmaterial und Entwicklung
- Auswertung
- Formantfilterverstärker
- Diaphanoskopie
- Exstirpierter Kehlkopf
- Fehlermöglichkeiten

ERGEBNISSE BEI NORMALEN STIMMLIPPEN

Ruhige Atmung
Hecheln
Husten
Gähnen
Lauthaftes Lachen
Betontes Sprechen
Weicher Stimmeinsatz
Harter Stimmeinsatz
Valsalva Pressversuch
Gedecktes Singen
Vokale

ERGEBNISSE BEI LÄHMUNGEN DER STIMMLIPPEN

ERGEBNISSE BEI TUMOREN DER STIMMLIPPEN

LEE-PHÄNOMEN

DISKUSSION

Glottographie
Hermannsche und Helmholtzsche Theorie
Neurochronaxische Theorie von Husson

LITERATURVERZEICHNIS

GESCHICHTE DER KEHLKOPFUNTERSUCHUNG

Das Phänomen der Stimme hat von jeher viele Zweige der Wissenschaft beschäftigt und Ärzte, Philosophen und Techniker sowie Psychologen haben sich mit den vielfältigsten Problemen der Stimme befaßt. Einer der größten Fortschritte in der Erforschung der Stimmgebung war die Verwendung von Spiegeln zur direkten Beobachtung des Kehlkopfes.

HOFFMANN, HELMHOLTZ und v. TRÖLTSCHE haben in den Jahren 1841 bis 1855 die Anwendung eines durchbohrten Hohlspiegels, mit dem sich eine große Lichtmenge auf einem kleinen Fleck sammeln läßt, in die klinische Untersuchung von schwer zugänglichen Körperstellen eingeführt. Der spanische Gesangslehrer GARCIA hat einen kleinen Spiegel in die Mundhöhle hinter die Uvula gebracht und konnte so unter Verwendung des durchbohrten Hohlspiegels den Kehlkopf sehen und damit die Stimm Lippen bei ihren Bewegungen exakt studieren.

Im Jahr 1858 haben dann TÜRCK und CZERMAK die Laryngoskopie, wie diese neue Untersuchungsmethode genannt wurde, für klinische und physiologische Zwecke vervollkommen. Damit war es möglich geworden, den Kehlkopf und seine Bewegungen am lebenden Menschen über mehrere Minuten zu beobachten und Befunde, die schon früher an ausgeschnittenen Kalbskehlköpfen und Leichenkehlköpfen erhoben worden waren, zu überprüfen.

Die Stroboskopie für die Beobachtung der Stimm Lippenbewegungen hat OERTEL im Jahre 1878 eingeführt. Er hat dazu eine Lochscheibe benutzt, deren Umdrehungsgeschwindigkeit geregelt werden konnte, und die er vor der Lichtquelle, welche ihr Licht auf den durchbohrten Hohlspiegel warf, angebracht hatte. So konnte das auf den Kehlkopfspiegel fallende Licht mit der für die Untersuchung erforderlichen Frequenz unterbrochen werden.

KALLEN und POLLIN haben die technische Durchführung der Stroboskopie bedeutend verbessert, indem sie die Tonfrequenz der untersuchten Person mit einem Mikrophon aufgenommen haben, durch einen Filterverstärker die Grundfrequenz herausgesiebt haben und mittels dieser Frequenz die Stromzufuhr zu einer Glühlampe unterbrochen haben. So stimmt die Frequenz des Stroboskopes in jedem Fall mit der Tonfrequenz des Patienten überein und gleicht sich jeder Veränderung der Frequenz der untersuchten Person an.

LOEBELL hat diese sogenannte physiologische Stroboskopie weiter ausgebaut, unter anderem durch die Einführung einer neuen zündungsfreien Glühlampe.

MUSEHOLD hat 1898 die ersten Photographien des phonierenden Kehlkopfes angefertigt.

KIRSTEIN ging 1895 mit einem starren Rohr in den Kehlkopf ein und konnte damit auch die Gegend unter der Stimmritze zur Beobachtung bringen.

TRENDELENBURG und WULLSTEIN haben zu Beginn des Jahrhunderts eine Gleichspannung zwischen die Stimmlippen und einer kleinen Kupferschiebe, welche in geringem Abstand von der Stimmritze angebracht war, gelegt und die Kapazitätsänderungen dieses Kondensatorsystems, welche sich aus der Änderung des Abstandes zwischen den beiden Kondensatorplatten ergeben haben, für die Analyse der Bewegungen herangezogen. Mit dieser Methode können ganz besonders Bewegungen der Stimmlippen senkrecht zur Stimmritze untersucht werden.

FABRE, ein Biophysiker aus Lille, hat in den vergangenen Jahren dieses Prinzip wieder aufgegriffen, indem er die beiden Stimmlippen wiederum als die Platten eines Kondensators benützt und einen hochfrequenten Wechselstrom an den Kondensator anlegt. Die Messung des Widerstandes für den Wechselstrom, der vom Abstand der beiden Kondensatorplatten abhängt, wird Glottographie genannt.

In München haben LOEBELL und BALK einen Glottographen konstruiert, der eine Modifikation des Originalgerätes von FABRE darstellt.

ANATOMIE DES KEHLKOPFES

Knorpel

Der menschliche Stimmapparat, die Glottis, liegt innerhalb des Larynx, der das obere Ende der Luftröhre darstellt. Die Glottis selbst umfaßt die Stimmfalte, die Schließmuskeln der Stimmritze und die beiden Aryknorpel. Um die Stimmritze liegen fünf Knorpelplatten, welche gegeneinander beweglich sind und so die Weite der Stimmritze regulieren können.

Der Schildknorpel, die Cartilago thyreoidea, welcher der größte Kehlkopfknorpel ist, trägt die vorderen Enden der Stimmbänder. Er ist durch die Membrana hypothyreoidea am Zungenbein aufgehängt und hält so den ganzen Kehlkopf in seiner Lage. Das Zungenbein selbst ist durch das Ligamentum stylohyoideum und die oberen Zungenbeinmuskeln am Schädel befestigt. Der Schildknorpel besteht aus zwei Seitenplatten, die vorne beim Mann unter einem Winkel von 90° , bei der Frau und beim Kind unter einem Winkel von $160 - 170^{\circ}$ zusammenstoßen. Der Schildknorpel selbst ist etwas nach vorne geneigt und es springt der Vorderrand der Cartilago thyreoidea unter der Haut hervor. Der obere Rand der Laminae ist geschweift, der untere Rand gerade. Am Hinterrand sind zwei Fortsetzungen ausgebildet, von denen die untere, das Cornu cricoideum, die Gelenkfläche für den Articulatio cricothyreoidea trägt. Das obere Horn, Cornu hyoideum, ist durch das Ligamentum hypothyreoideum mit dem Zungenbein verbunden.

Der Ringknorpel, die Cartilago cricoidea, hat einen ventralen Bogen, den Arcus, und eine hintere in die Höhe gezogene Platte, die Lamina. Diese ist die Vorderwand des Hypopharynx. Der obere Rand des Knorpels steigt langsam vom Arcus zur Lamina auf und hat am Übergang vom Arcus zur Lamina einen Gelenkkopf für die Artikulation mit dem Stimmknorpel.

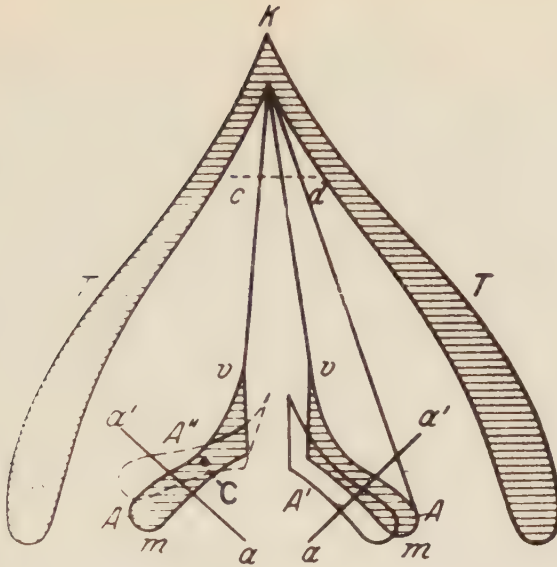
Die beiden Stimmknorpel, Cartilago arytaenoideae, haben die Form einer dreiseitigen Pyramide. Ihre Basis ist quer gehöhlt als Pfanne für den Gelenkkopf am Ringknorpel. Lateral davon liegt der Processus muscularis, an welchem Muskeln von der Cartilago cricoidea ansetzen. Nach vorne schräg geht von der Basis eine spitze, von elastischen Knorpel gebildete Fortsetzung, der Processus vocalis. Die mediale Fläche ist glatt und bildet mit der gegenüberliegenden Fläche des zweiten Aryknorpels die Pars intercartilaginea der Stimmritze. Die hintere Fläche ist gehöhlt und nimmt den Musculus arytaenoideus auf. Die Außenfläche ist durch eine bogenförmige Crista arcuata in zwei Felder geteilt, davon wird die obere Fläche Fovea triangularis genannt. Die untere Fläche, Fovea oblongata, nimmt den Musculus vocalis auf.

Gelenke

Die Artic. cricothyreoidea ist meist eine Diarthrose, in seltenen Fällen einmal eine Syndesmose. Die Gelenkfläche der Art. cricoidea fällt von medial und hinten nach lateral, vorne und unten. Der Schildknorpel und der Ringknorpel können in ihrem Gelenk eine Scharnier- und eine Gleitbewegung ausführen. Wie MAYET und MÜNDNICH beschreiben, bringen allerdings extreme Kippstellungen Blockierungen, so daß keine Bewegungen, weder craniocaudal noch ventrodorsal, ausgeführt werden können. Die Bänder selbst bringen das Gelenk wieder in die Ruhelage zurück. VAN DEN BERGH hat diese Untersuchungen bestätigt.

Die Excursionsgrenzen des Gelenkes sind gegeben durch das Ligamentum ceratocricoides posterius und laterale, welches zwischen Ringknorpel und Schildknorpel verläuft, weiter durch das Lig. cricothyreoides.

Die Cart. arytaenoideae sind gegenüber der Cart. cricoidea in dreifacher Weise beweglich. Die pyramidengleichen Knorpel sind erstens einmal um ihre Höhenachse drehbar. Der Schnittpunkt dieser Achse mit der Zeichenebene ist auf der Zeichnung 1 mit C angegeben. Die Aryknorpel sind weiter um die Achse a - a' neigbar. Drittens können sie in Richtung der Achse a - a' gleiten. Diese Bewegungen gestatten eine Veränderung der Stimmritze in feiner, abgestufter Weise.



Schema der Bewegungsmöglichkeiten des Stellknorpels. A, A', A'' Stellknorpel in verschiedenen Lagen; a-a' Achsen, um die die Stellknorpel (außer der Drehung um eine senkrechte Achse und ihrem Gleiten gegeneinander) neigbar sind; m Proc. muscularis; v Proc. vocalis; T Schildknorpel.

(Nach HERMANN: Lehrbuch der Physiologie.)

Die Achsen des Cricoarytaenoidgelenkes

Muskeln

Den differenzierten Bewegungen des Kehlkopfes dienen zahlreiche Muskeln, welche symmetrisch zur Medianlinie liegen.

Der *Musculus cricothyreoideus* entspringt beidseits dicht neben der Mittellinie am Bogen des Ringknorpels. Er zieht sowohl lateralwärts wie kranialwärts und inseriert am kaudalen Rand des Schildknorpels und am Innenrand des *Cornu cricoideum*.

Von der Dorsalfläche der *Lamina cartilaginis cricoideae* entspringt aus einer Vertiefung der *Musculus cricoarytaenoideus dorsalis*, welcher lateralwärts und kranial zieht, um am *Processus muscularis* der *Cartilago arytaenoidea* anzusetzen. Gelegentlich spaltet sich von diesem Muskel ein kleines Bündel, welches dorsal vom *Cornu cricoideum* der *Cartilago thyreoidea* vom kaudalen Rand des Ringknorpels entspringt und zum *Cornu cricoideum* lateral und kranialwärts zieht, ab. Dieser Muskel wird als *Musculus ceratocricoides* bezeichnet.

Der *Musculus arytaenoideus* besteht aus einer *Pars transversa* und einer *Pars obliqua*. Erstere verläuft quer über den kaudalen Teil der dorsalen Fläche beider *Cartilagines arytaenoideae* und heftet sich an die lateralen Ränder dieser Knorpel.

Die *Pars obliqua* entspringt vom *Processus muscularis* und wendet sich schräg zum kranialen Teil der *Cartilago arytaenoidea* der Gegenseite. Sie liegt auf der Dorsalfläche der *Pars transversa*.

Vom kranialen Rand und der Außenfläche der Seitenteile der *Cartilago cricoidea* geht der *Musculus cricoarytaenoideus lateralis* ab. Er geht mit einem schrägen und kranialen Verlauf zum *Processus muscularis* der *Cartilago arytaenoidea*.

Der *Musculus thyreoarytaenoideus* läßt sich wieder in zwei Teile zerlegen. Der kaudale Teil wird als *Pars lateralis* bezeichnet, während die kraniale Abteilung *Musculus vocalis* genannt wird. Dieser zieht vom Schildknorpel zur *Fovea oblongata* des Aryknorpels. Er liegt innerhalb des Stimmbandes, welches von dem nach vorne gerichteten *Processus vocalis* des Aryknorpels zur Mitte der Innenfläche des Schildknorpels zieht.

Als Stimmlippen, *Labia vocalia*, bezeichnet man die auf dem Querschnitt dreieckigen Wülste mit ihren eingelagerten Muskeln. Stimmbänder im anatomischen Sinn sind die elastischen Längszüge des oberen Randes des *Conus elasticus*, während die *Ligamenta vocalia* mit ihrem Schleimhautüberzug als *Plicae vocales* bezeichnet werden. Der Spaltraum zwischen den beiden Stimmlippen wird als *Rima glottidis* bezeichnet.

Diese wird verengt:

- a) durch den *Musculus cricoarytaenoideus*, welcher auch eine leichte Hebung des *Proc. vocalis* der *Cart. arytaenoidea* bewirkt,

- b) durch den *Musculus thyreoarytaenoideus pars lateralis*.
Er senkt auch den *Proc. vocalis*,
- c) durch den *Musculus arytaenoideus*, der sich aufteilen läßt in eine *pars transversa* und in eine *pars obliqua*.

Erweitert wird die Stimmritze durch den *Musculus cricoarytaenoideus posterior*, im Klinikgebrauch auch *Posticus* genannt.

Die Stimmklappen haben durch die elastischen Fasern des *Conus elasticus* einen gewissen Spannungszustand. Durch Muskelwirkung kann nun diese Spannung aktiv oder passiv geändert werden. Die aktive Einstellung der benötigten Spannung erfolgt durch den *Musculus vocalis sive M. thyreoarytaenoideus pars medialis*, der in den Stimmklappen gelagert ist. Zahlreiche Muskelfasern sind, wie ZENKER beschrieben hat, multipel innerviert und besitzen dementsprechend zwei oder mehrere Endplatten. Die genaue Fasernstruktur des *Musculus vocalis* ist von GÖRTTLER aufgeklärt worden, der zwischen einem *M. thyreovocalis* und einem *M. aryvocalis* unterscheidet. Die Hauptmasse des *M. vocalis* strahlt schräg in das Stimmband ein und inseriert in der Schleimhaut. Der *M. aryvocalis* entspringt ziemlich lateral bis zum *Proc. muscularis* reichend und zieht unter Kreuzung des *M. thyreovocalis*, welcher vom Schildknorpel entspringt, schräg nach aufwärts. Durch diesen Faserverlauf kann der *M. vocalis* außer einer isometrischen Spannung der Stimmklappen durch Kontraktion einzelner Muskelfasern die Form der Stimmklappen verändern, Massen verlagern und Spannungsunterschiede innerhalb der Stimmklappen bewirken.

Die Zeichnung zeigt den rechten Aryknorpel und den *Musculus vocalis* von vorne.



Schema des Verlaufs der Muskelfasern im M. vocalis. Darstellung des rechtsseitigen Aryknorpels von oben gesehen (Nach Goerttler)

ZENKER hat in seinen Untersuchungen dieses Verhalten der einzelnen Fasern bestätigt.

Die passive Veränderung der Stimmlippen tritt unter normalen Verhältnissen in den Hintergrund, sie ist aber von großer Bedeutung beim Ausfall der Kehlkopfmuskeln. Zu den Kehlkopfmuskeln gehört der *M. cricothyroideus*, welcher von der *Cart. thyroidea* fächerförmig nach unten und vorne zur *Cart. cricoidea* zieht. Bei seiner Kontraktion wird die *Cart. cricoidea* in dem *Artic. cricothyroideus* nach hinten gekippt, eine Folge der Kraftkomponentenverteilung in diesem Muskel. Es ergibt sich eine Vergrößerung des Abstandes Schildknorpel - Ringknorpel und damit eine Verlängerung und Spannung der Stimmlippen.

Zu dieser Veränderung des Stimmbandes durch die Kehlkopfmuskeln kommt noch eine Reihe weiterer Kräfte, wie sie ZENKER beschreibt.

Die Verlängerung des Stimmbandes bewerkstelligen außer dem *M. cricothyroideus* noch der Zug des Ösophagus und der *M. thyreopharyngeus*. Die *pars cervicalis* des Ösophagus beginnt im caudalen Drittel des Ringknorpels, wo die Längsmuskelschicht des Ösophagus an dem First, welcher die Ursprungfelder der beiden *M. cricoarytaenoidei* trennt, entspringt. Der Zug des Ösophagus senkt die *Cart. cricoidea* nach hinten und entfernt so die Aryknorpel von dem Ringknorpel. Der Ösophagus hat aber eine große Beweglichkeit, so daß dieser Mechanismus nur bei gesenktem Zwerchfell oder Rückbeugung des Kopfes möglich ist. Bei Rückbeugung des Kopfes wird die längs der Stimmlippen angreifende Kraftkomponente größer.

Der *M. thyreopharyngeus* entspringt von der Außenfläche der *Cart. thyroidea* und steigt steil aufwärts zur *Raphe pharyngis*. Seine Konstruktion drückt die beiden Schildknorpelplatten zusammen und verlängert damit den Schildknorpel, der etwas elastisch ist.

Zur Verkürzung der Stimmlippen dienen der *M. sternothyroideus*, *M. cricopharyngeus* und funktionelle Kräfte.

Der *M. sternothyroideus* kippt den Schildknorpel nach hinten und ist somit ein reiner Antagonist des *M. cricothyroideus*. Die oberen Anteile des *M. cricopharyngeus* ziehen vom Ringknorpel aus steil nach oben und heben bei ihrer Kontraktion den Hinterteil der *Cart. cricoidea*.

Die funktionellen Kräfte sind die Einheit Cricoid-Aryknorpel-Epiglottis-Zungenbein-Mandibula-Trachealzug. Eine Hebung der Mandibula überträgt sich über die *Plica aryepiglottica* direkt auf die Aryknorpel und auf den Ringknorpel. Es geht die *Cart. cricoidea* in ihrem dorsalen Teil in die Höhe und nähert sich damit dem Schildknorpel.

Beim Trachealzug liegt die resultierende Kraft vor der queren Achse des *Artic. cricothyroideus* und senkt somit den Vorderrand der *Cart. cricoidea*.

Diese anatomischen Befunde sind durch elektromyographische Untersuchungen bestätigt worden. Bei Ruhelage des Kehlkopfes zeigt das

EMG eine minimale Aktivität im Spannaparat und den äußeren Kehlkopfmuskeln. Es herrscht ein mittleres Spannungsverhältnis zwischen den elastischen Lamellen und der Muskelkraft. Bei der ruhigen Atmung lassen sich hauptsächlich im M. vocalis Ableitungen machen. Der Trachealzug ist bei der Inspiration vergrößert und dadurch der Vorderteil des Ringknorpels gesenkt. Beim Singen eines hohen Tones steigt die Kraft des Trachealzuges durch das Hochgehen des Kehlkopfes an, so daß die Verlängerer der Stimmlippen diese Verkürzung noch zusätzlich kompensieren müssen. Diese Aktivitäten lassen sich auch beim "inneren Singen" messen.

Innervation

Die Innervation des Kehlkopfes erfolgt durch den N. vagus, welcher der Nerv des vierten und der folgenden Kiemenbogen ist. Die Muskulatur des Kehlkopfes entsteht mit Ausnahme des M. cricothyreoideus aus dem sogenannten "inneren Sphinkter", welcher vom letzten R. posttrematicus, der den N. laryng. caudalis abgibt, versorgt wird.

Der M. cricothyreoideus stammt vom "äußeren Sphinkter" ab und müßte dementsprechend vom Plexus pharyngicus innerviert werden. Doch besteht beim Menschen hier eine Ausnahme, indem die motorischen Fasern für den Muskel im R. externus des N. laryngicus cranialis verlaufen. Der N. laryngicus cranialis ist der R. posttrematicus des vierten Kiemenbogens. Gelegentlich wird der M. cricothyreoideus durch einen Zweig aus dem N. laryngicus caudalis noch mit versorgt, was die Vermutung nahe legt, daß die innere Schicht des Muskels ursprünglich nicht aus dem "äußeren Sphinkter", sondern aus dem "inneren Sphinkter" stammt.

Der R. internus des N. laryngicus cranialis durchbohrt die Membrana thyreoidea und steigt unter der Schleimhaut des Recessus piriformis nach medial abwärts. Er leitet mit seinen Rami laryngici sensible Afferenzen aus dem Kehlkopf absteigend bis zur Rima glottidis ab. Daneben ergibt er noch Rami epiglottici und Rami pharyngici für die Schleimhaut in der Pars laryngica des Pharynx ab. Die Sensibilität der Schleimhaut selbst spielt für die Innervation des Kehlkopfes bei der Phonation eine gewisse Rolle, denn nach Kokainisierung der Schleimhaut ist die Stimmgebung in geringem Ausmaß gestört. Von größerer Bedeutung sind die Afferenzen der propriozeptiven Apparate der Kehlkopfmuskeln, denn ein Ausfall dieser Afferenzen hat das nicht mehr behebare Unvermögen, Töne genau nachzusingen, zur Folge. Muskelspindeln im M. vocalis selbst, wie sie GOERTTLER beschrieben hat, konnten bis heute noch nicht nachgewiesen werden, doch hat

ZENKER Stellen gefunden, die Muskelspindeln durchaus ähneln.

Ein R. *communicans* verbindet sich mit einem aufsteigenden Ast des N. *laryngicus caudalis* an der Hinterfläche des Kehlkopfes auf oder im M. *cricothyreoideus dorsalis* und ist somit an der sensiblen Versorgung der Trachea auch mit beteiligt.

Der N. *laryngicus caudalis* ist ein Ast des N. *recurrens* und teilt sich in den R. *ventralis*, welche die motorische Innervierung folgender Muskeln bewerkstelligt:

M. *cricothyreoideus lateralis*, M. *thyreoarytaenoideus*, M. *vocalis*, M. *thyreoepiglotticus* und M. *aryepiglotticus*.

Der zweite Ast, R. *dorsalis*, versorgt den M. *cricoarytaenoideus dorsalis*, M. *interarytaenoideus* motorisch und die Schleimhaut des Kehlkopfes unterhalb der Stimmritzen sensibel.

LINDEMANN hat beim Hund Aktionsströme im N. *laryngicus cranialis* und *caudalis* gemessen, deren Frequenz weitgehend der des Stimmtones entsprechen soll. Die Nervenimpulse im N. *laryng. cranialis* fließen offenbar von den Rezeptoren der Schleimhaut und der Muskeln zur Medulla oblongata, sollen dort auf die Muskelkerne im Nukleus ambiguus umgeschaltet werden und zu den Erfolgsorganen weitergeleitet werden. Doch ist das anatomische Substrat für diese Untersuchungen noch nicht geklärt.

PHYSIOLOGIE DER STIMMBILDUNG

Schwingungen der Stimmlippen

Die Schwingungen der Stimmlippen bei der Phonation sind nach allgemeiner Anschauung selbsterregte Schwingungen. Durch die Luftströmung bei der Expiration verstärkt sich der Druck unter der Rima glottidis und sprengt die Stimmlippen. Es strömt vermehrt Luft aus, der Druck sinkt und die Stimmbänder nähern sich dank ihrer Elastizität wieder. Hierauf erfolgt wieder ein Ansteigen des Druckes und der Vorgang läuft von neuem ab.

Durch die wechselnden Druckverhältnisse führen die Masseteilchen der Luft Hin- und Herbewegungen in Richtung der Strömung aus. Es handelt sich um longitudinale Wellen mit Teilchenverschiebungen in der Wellennormalen. Die Wellennormale ist die Ausbreitungsrichtung der Schwingungen. Es bilden sich dabei Bereiche, in denen der Druck erhöht und die Masseteilchen zusammengedrückt werden. In einer Entfernung einer halben Wellenlänge sind Bereiche, in denen die Masseteilchen gegen die Richtung der Wellenfortpflanzung sich bewegen und zu einer Druckerniedrigung führen.

Durch Veränderung der Spannung der Stimmlippen ändert sich der Elastizitätsmodul und damit die rücktreibende Kraft, welche das System in die ursprüngliche Ruhelage bringt. Durch die veränderte Kraft kommt es zu einer Änderung der momentanen Geschwindigkeit und damit zur Frequenzänderung der Stimmlippenbewegung. So läßt sich die Tonhöhe regulieren.

Die Schallstärke hängt von der Höhe des Druckes im Windrohr und der Geschwindigkeit des Luftstromes ab. Die Zunahme der Amplituden der Stimmlippenschwingungen bei Zunahme dieser Größen ist sehr viel geringer als die Zunahme der Schallstärke. LUCHSIGER konnte zeigen, daß beim Ansteigen der Schallintensität auf das 100 fache die Amplituden der Stimmlippenschwingungen sich nur um 3 mm erweitern. Eine Erhöhung des Anblasedruckes führt aber zu einer Erhöhung der Tonhöhe und so muß beim Lauterwerden eines Tones bei gleichbleibender Frequenz durch eine Gegenregulation eine Erschlaffung der Stimmbänder eintreten. Der Luftverbrauch steigt mit der Schallstärke und ist beim Baß höher als beim Sopran. Die Werte liegen für den Baß bei 100-200 ccm/sec, beim Sopran 40-90 ccm/sec. Die Strömungsgeschwindigkeit der Luft ist aus der engsten Stelle des Atemrohrs, in der Stimmritze, am höchsten und beträgt bei ruhiger Atmung 3-5 cm/sec, bei Hustenstößen bis zu 120 cm/sec. Bei genügend hoher Geschwindigkeit können auch Spalttöne mit sehr hoher Frequenz in den Räumen über der Rima glottidis entstehen. Auf diese Weise erzeugen Tiere Töne, die für das menschliche Ohr wegen der hohen Frequenz nicht hörbar sind.

HAST hat bei tracheotomierten Patienten die Frequenz der Stimm lippen-schwingungen und zugleich den subglottischen Druck gemessen, wobei er zu folgendem Ergebnis kam: 2 cm Wassersäule-Druck bei 139 Hz, 3 cm bei 178 Hz, 4 cm bei 209 Hz. Bei 444 Hz und leiser Aussprache sind 5-6 cm gemessen worden, während bei lauter Sprache der Druck bis auf 16 cm angestiegen ist.

Zu der genannten Art zu schwingen ist noch zu erwähnen, daß die Stimm lippen auf Grund ihrer im Querschnitt dreieckigen Form auf Luftströme von unten her besonders gut ansprechen müssen. Wären nur die Polster elastisch, so gäbe es kein Phonieren bei der Inspiration, wie sie ja bekanntlich vorkommt. Es müssen also auch die Bänder, an denen die Zungen befestigt sind, elastisch sein.

Die stroboskopische Untersuchung zeigt, daß die Stimm lippen beim Schwingen keine reine Seitwärtsbewegung ausführen, sondern auch etwas vertikal sich bewegen.

Die freien Ränder der Stimm lippen beschreiben also elliptische Bahnen. Der Schluß der Stimmritze ist somit ein Abrollen der Lippen und kein Zusammenschlagen mit einer plötzlichen Richtungsumkehr, wie sie bei rein horizontalen Schwingungen auftreten müßten. Durch diese Art zu schwingen wird die Beanspruchung des Gewebes gemindert.

EWALD hat an seinen Polsterpfeifen diese Art von Schwingungen ebenfalls registriert. HUSSON hat stroboskopisch bei offen gesungenen Vokalen eine Vertikalkomponente gefunden, nicht jedoch bei gedeckt gesungenen Vokalen. Nach E. MÜLLER nimmt die senkrechte Komponente beim Ansteigen des Anblasedruckes zu.

SCHÖNHÄRL beschreibt ein Fibriieren der Randkanten der Stimm lippen in sehr hoher Geschwindigkeit und bezeichnet diese Erscheinung als Randschwingungen. Sie sollen nach seiner Meinung die Obertöne liefern.

Der Tonbereich, den eine Stimme einschließt, wird als Stimmumfang bezeichnet und ist nach Alter und Geschlecht unterschiedlich. Er beträgt im Durchschnitt zwei Oktaven.

Die Klangfarbe der Stimme wird von dem Stärkeverhältnis eines Lautes bestimmt. Diese Klangfarbe wechselt an mehreren umschriebenen Stellen in der Tonfolge einer Stimme mit einer deutlich hörbaren Änderung des Stimmklanges. Diese Stellen begrenzen die Register der Stimme. Das tiefe Register ist die Bruststimme, das hohe die Kopfstimme und daran schließt sich noch die Fistelstimme an.

Bruststimme

Bei der Bruststimme ist der Thorax in stärkerem Maße mit Schwingungen der knöchernen Wandung an der Stimmgebung beteiligt als bei der Kopfstimme, bei welcher der Kehlkopf höher steigt. Die Stimmritze ist bei jeder Schwingungsperiode nur kurz geöffnet.

Auf den von MUSEHOLD angefertigten Photographien sieht man bei einigermaßen laut gesungenen Tönen im Brustregister, wie sich die Stimmlippen breit aneinanderlegen.

WEISS, TRENDELENBURG und WULLSTEIN haben diese Untersuchungen am Modell bestätigt. Sie haben einen Öffnungsquotienten (= Öffnungszeit/Dauer der ganzen Periode) von 0.2 bei tiefen Tönen (90 Hz) bis 0.7 bei hohen Tönen (400 Hz) gefunden. TRENDELENBURG hat diese Untersuchung am Lebenden durchgeführt, indem er hochfrequente Töne, welche im Augenblick der Öffnung und der Schließung der Stimmlippen entstehen, mit einer Siebkette heraussiebte. Die Aufzeichnung der genauen seitlichen Verhältnisse ergibt dabei Werte von 0.3 bis 0.7, annähernd linear mit der Frequenz ansteigend.

FABRE hat während der kompletten Schließung der Glottis im Mund einen Unterdruck gemessen, der mit zunehmender Frequenz geringer wurde. Er hat auch eine brüske Öffnung der Glottis beobachtet, die mit einer eingeschobenen Drucksenkung im allgemeinen Druckkurvenverlauf einhergeht.

Kopfstimme

Bei hohen Tönen der Kopfstimme berühren sich die Stimmlippen während der Phonation nicht mehr, sondern lassen einen Spaltraum dauernd offen. Der schwingende Anteil der Stimmlippen wird verkürzt, indem die Pars intercartilaginea geschlossen bleibt.

Bereits MUSEHOLD hat bei der Untersuchung am Lebenden ein stärkeres Schwingen der Ränder der Stimmbänder bei der Kopfstimme gesehen. Mit der modernen Stroboskopie und der Hochfrequenzkinematographie werden diese Befunde bestätigt.

Es findet in der Kopfstimme eine Entspannung der Stimmlippen statt. Diese Entspannung, wie sie bei der zur Erzeugung hoher Töne nötigen Spannungszunahme paradox erscheint, kann in den einzelnen Anteilen der Stimmlippen verschieden stark sein und durch Verminderung der schwingenden Maße ausgeglichen werden. Wenn man sich den M. vocalis mit seinen komplizierten Faserverlauf betrachtet, so ist dies durch Kontraktion nur eines Muskelzuges möglich. Bei Kontraktion beider Muskelsysteme, M. thyreo vocalis und M. aryvocalis, findet eine gegenseitige Verdrehung und damit eine Versteifung statt. Bei Kontraktion nur eines Muskels kommt es zu einer Lösung der Verwicklung und

einer Massenverschiebung von medial nach lateral. Dadurch wird die schwingende Masse verringert, was nach der Formel $N = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E}{M}}$

(N = Schwingungszahl; E = Volumenelastizitätskoeffizient; M = Masse) eine Erhöhung der Schwingungszahl zur Folge hat.

Die Längenzunahme der Stimmlippen mit steigender Tonhöhe zeigen die von PRESSMANN mittels Zeitdehneraufnahmen gemachten Photographien sehr deutlich. PRESSMANN hat zu diesem Zwecke einzelne Punkte auf den Stimmlippen mittels Kohlestoff markiert und diese Abstände der Kohlenstoffpunkte sehr genau ausgemessen.

MITCHINSON kommt bei seinen röntgenologischen Aufnahmen zu dem gleichen Ergebnis.

Die Schwingungen des primären Systems, nämlich Stimmritze und Luftstrom, führen zu Schwingungen des Luftraumes des gesamten Stimmapparates. Die schließlich durch die Mundöffnung ausgestoßene Luftschwingung ergibt den endgültigen Stimmenklang.

UNTERSUCHUNGEN VON FABRE

UNTERSUCHUNGSMETHODEN

Glottographie

Im Jahre 1957 wurde von dem Biophysiker FABRE eine neue Methode zur elektrischen Registrierung der Bewegungen der Stimmlippen veröffentlicht.

Der dieser neuen Untersuchungsmethode zugrunde liegende Gedanke ist verhältnismäßig einfach. Es werden die Stimmlippen als Platten eines Kondensators, der in einen Wechselstromkreis zwischengeschaltet ist, betrachtet. Der Kondensator stellt für den Wechselstrom einen kapazitiven Widerstand dar. Je nach Stellung der Stimmlippen zueinander ändert sich die Kapazität und damit der Widerstand, was sich leicht messen läßt. Beim Nähern der Stimmlippen zueinander wird der Abstand der Kondensatorplatten geringer, die Kapazität größer und damit der Widerstand kleiner. Die Spannung des Stromes steigt dementsprechend an. Beim Auseinanderweichen der Stimmlippen wird die Kapazität kleiner und es verringert sich die Spannung. Die Frequenz des Wechselstromes bleibt während der gesamten Untersuchungsdauer konstant und wird von einem Generator geliefert. Die Stromzuführung erfolgt mittels zweier Hautelektroden, die beiderseits an den *Laminae cartilaginis thyreoideae* angelegt werden.

Von einem Oszillator, der aus einem Gleichrichter gespeist wird, wird ein hochfrequenter Wechselstrom mit hoher Konstanz geliefert. An diesen Schwingungskreis ist ein zweiter Stromkreis induktiv angekoppelt. In diesem zweiten Stromkreis befinden sich die beiden Hautelektroden, die beiderseits am Schildknorpel angelegt werden. Die induktive Kopplung ist verhältnismäßig gering, um die übertragenen Stromstärken niedrig zu halten und damit Diathermieeffekte zu vermeiden. Eine zu starke Kopplung könnte auch eine Änderung der Induktivität im ersten Schwingungskreis herbeiführen und so eine Frequenzänderung im Oszillatorssystem bewirken. Die Stromstärke des fließenden Stromes ändert sich entsprechend dem kapazitiven Widerstand, welcher von den beiden Stimmlippen gebildet wird, ständig. Daraus ergibt sich eine amplitudenmodulierte Hochfrequenzspannung, welche an das Gitter einer Pentode gelegt wird. Die verstärkte Gleichspannung wird über weitere Verstärker auf eine Ausgangshexode geleitet.

Kathodenstrahloszillograph

Von der Ausgangshexode wird die Ausgangsspannung auf einen Zweistrahloszillographen gelegt. Der Oszillograph hat eine stufenlos regulierbare Ablaufgeschwindigkeit.

Phonographie

Mit Phonographie bezeichnet FABRE das Aufzeichnen der Luftschwingungen, welche vor der Mundhöhle bei der Phonation bestehen. Er benutzt hierzu ein Kondensatormikrophon, welches in einen Abstand von 20 cm vor den Lippen der Versuchsperson angebracht ist. Die frequenzmodulierte Spannung wird gleichgerichtet und mit einer konstanten Frequenz interferiert. Die sich daraus ergebende Spannungsänderung wird auf den Kathodenstrahloszillographen geleitet.

ERGEBNISSE VON FABRE

FABRE hat mit seiner neuen Untersuchungsmethode die Phonation bei normalen Stimmlippen sehr ausgiebig untersucht.

Bruststimme

In seinen ersten Veröffentlichungen hat FABRE die Glottogramme der Phonation im Brustregister bei verschiedenen Intensitäten gezeigt. Bei mittlerer Schallstärke tritt ein sogenanntes Schließungsplateau in der Kurve auf. Die Stimmlippen kommen zu einem festen Schluß zusammen und verweilen in dieser Stellung für eine Zeitdauer, die ungefähr ein Drittel der gesamten glottischen Phase entspricht. Als glottische Phase bezeichnet FABRE ein Schließen und das darauf folgende Öffnen der Stimmritze, wie es bei jeder Phonation auftritt.

Bei stärkerer Intensität der Stimme wird das Schließungsplateau zunehmend kleiner und schließlich gehen Schließungs- und Öffnungsphase in einem spitzen Gipfel, entsprechend einer schnellen Umkehr von der Schließung in die Öffnung, in einander über.

Die Phonation selbst tritt jeweils im aufsteigenden Ast der Kurve auf. Es muß also die Stimmritze erst etwas verengt sein, bevor es zur Stimmbildung kommt.

Während der vollkommenen Schließung der Glottis herrscht in der Mundhöhle ein Unterdruck.

Bei der Beobachtung der einzelnen Vokale sieht FABRE einen Unterschied zwischen dem Vokal A und den übrigen Vokalen in ihrem glottographischen Verhalten. Die Luftschwingungen, welche vom Mikrophon vor dem Mund der Versuchsperson registriert werden, treten beim Vokal A bereits im Fuß der aufsteigenden Kurve auf. Im phonatorischen Glottogramm erkennt man dementsprechend bereits zu Beginn der Schließungsphase die Oszillationen der Stimmlippen. Dagegen tritt das Vibrieren der Stimmlippen bei den übrigen Vokalen etwa in der Mitte der aufsteigenden glottographischen Kurve auf, zu einem Zeitpunkt also, wo sich die beiden Stimmlippen schon sehr nahe gekommen sind.

Fistelstimme

Bei der Stimmbildung in der Fistelstimme ist die Schließung der Stimmlippen inkomplett und die Amplitudenweite der Glottographie sehr gering.

GAUTHIER sieht in seinem Glottogramm beim Pianissimo einen langsamen Anstieg der respiratorischen Glottographie mit einem kurzen festen Schluß der Stimmlippen. Das Fortissimo zeigt eine kurze und dementsprechend rasche Annäherung mit einem längeren festen Schluß der Stimmlippen.

Nachsingen eines Tones

Wird einer Versuchsperson ein Ton, der mit hoher Frequenzkonstanz von einem Tongenerator erzeugt wird, mittels eines Kopfhörers in das Ohr geleitet und versucht die Person den gleichen Ton zu singen, so zeigt das Glottogramm genau die halbe Frequenz des vorgespielten Tones. FABRE erklärt dies mit der stärkeren Intensität, die der erste harmonische Ton eines Lautes hat. Die Versuchsperson stellt nach seiner Meinung ihre glottischen Bewegungen, die den Basiston abgeben, nach dem ersten harmonischen Oberton ein. Bei einem reinen Ton, wie er von einem Tongenerator erzeugt wird, empfindet nun der Mensch den Ton wiederum als ersten Oberton und dementsprechend hat der nachgesungene Ton genau die halbe Frequenz des vorgespielten Tones.

Stimmeinsatz

Beim harten Stimmeinsatz gehen dem phonatorischen Vibrieren der Stimmlippen Oszillationen, die von FABRE als präparatorisch bezeichnet werden, voraus. FABRE sieht in ihnen Einstellungsbewegungen der Stimmlippen zur nachfolgenden Phonation.

Beim weichen Stimmeinsatz sind derartige Bewegungen nicht zu erkennen. Die Stimmlippen sind beim Einsetzen der Stimme noch weit geöffnet.

Klonus und Tonus der Kehlkopfmuskeln

FABRE unterscheidet drei klonische Funktionen der Kehlkopfmuskulatur, nämlich eine langsame Schließung und Öffnung der Stimmlippen, wie sie etwa bei der ruhigen Atmung auftritt. Daneben muß es noch eine schnelle Bewegung für die Phonation geben. Weiter ist noch eine tonische Funktion nötig, um eine Stellung der Stimmlippen zu fixieren. Dieses Halten der augenblicklichen Stellung ist unabhängig von der Phonation, zeigt aber über eine längere Zeit beobachtet ein langsames An- und Abswellen, entsprechend einer rhythmisch ablaufenden Zu-

und Abnahme des Tonus. Ein solches Schwanken des Tonus sieht man etwa bei einer langanhaltenden Phonation eines Tones in gleicher Frequenz und Intensität. FABRE nimmt aufgrund dieses von der Phonation unabhängigen Auftretens einer Tonusschwankung der Larynxmuskulatur an, daß zwischen einer klonischen und tonischen Muskelfaser unterschieden werden muß.

EIGENE U N T E R S U C H U N G E N

UNTERSUCHUNGSMETHODEN

Glottographie

An Hand der Schaltpläne der seinerzeit veröffentlichten Arbeit von FABRE haben in München ein Arzt und ein Physiker, LOEBELL und BALK, ein Gerät gebaut, das zwar die gleiche theoretische Grundlage wie der Originalapparat von FABRE besitzt, in der technischen Ausführung jedoch Unterschiede besonders in der Verstärkerweise aufweist.

Von einem Gegentakt-Hartley-Oszillator wird ein hochfrequenter Wechselstrom auf zwei dem Kehlkopf beidseitig anliegenden Elektroden von je 2,5 cm Durchmesser zugeführt. Die schwankende Impedanz des Kehlkopfes bewirkt an dem Vorwiderstand eine Modulation der Hochfrequenzspannung an den Elektroden. Die modulierte HF-Spannung wird einem abgestimmten HF-Verstärker zugeführt und anschließend gleichgerichtet.

Die Modulationstiefe der HF-Spannung ist sehr gering, da die induktive Koppelung des Elektrodenkreises an den Oszillatorkreis nur gering sein kann, um die übertragene Energie klein zu halten, da sonst im menschlichen Gewebe eine größere Wärmeentwicklung auftreten könnte. Deshalb wird bei der 2. Stufe der HF-Verstärkung der Abstand zwischen Arbeitspunkt und Einsatzpunkt proportional zur unmodulierten HF-Ausgangsspannung gemacht. Letzteres wird durch einen HF-Gleichspannungswandler bewirkt, der eine zur unmodulierten HF-Ausgangsspannung proportionale Gleichspannung erzeugt, von der ein Bruchteil den Arbeitspunkt der Verstärkerstufe festlegt.

Nach der Gleichrichtung erfolgt durch eine Frequenzweiche eine Trennung in tonfrequente Modulationsanteile, die getrennt und gleichzeitig registriert werden.

Unterschied zu FABRE

1. Gegentakt - Hartley - Oszillator
2. Abstand zwischen Arbeitspunkt und Einsatzpunkt ist proportional der Oszillatorausgangsspannung.

Es werden nur die interessanten Frequenzspitzen verstärkt und die langsamen und schnellen Anteile getrennt und gleichzeitig registriert. Die Aufzeichnungen der schnellen Stimmlippenbewegungen werden als phonatorische Glottographie bezeichnet, während man die langsameren respiratorische Glottographie nennt.

Kathodenstrahloszillograph

Die verstärkten Ströme werden auf einen Kathodenstrahloszillographen zur Beobachtung geleitet.

Es handelt sich um einen Zehnkanschreiber der Firma KNOTT. Die Ablaufgeschwindigkeit der Kathodenstrahlen ist stufenlos regelbar. Wir verwenden hauptsächlich Geschwindigkeiten, bei denen entweder 3 msec oder 100 msec 1 cm auf dem Bildschirm durchlaufen werden. Die eingestellte Ablaufgeschwindigkeit ist von der Fragestellung abhängig.

Photographische Aufzeichnung

Die vom Oszillographen gelieferten Kurven werden mit einer Leica M2 photographisch registriert. Der Abstand zwischen Objekt und Filmebene beträgt 60 cm. Zwischen Kamera und Bildschirm ist ein Lichtschacht montiert, der Lichteinfall von außen verhindert. Die Auslösung des Kameraverschlusses und des Oszillographen erfolgt synchron.

Filmmaterial und Entwicklung

Als Filmmaterial verwenden wir einen Adox KB 17, den wir etwas unterbelichten und über die von der Herstellungsfirma angegebene Zeit im Entwicklerbad lassen. Dadurch wird das Bild klarer und die Kathodenstrahlen schärfer gezeichnet. Die noch nachleuchtenden vorher abgelauenen Strahlen kommen auf dem Negativ nicht mehr durch. Versuche mit Farmerschen Abschwächer brachten kein besseres Ergebnis. Zum Entwickeln selbst benutzen wir den Feinkornentwickler Eukobrom.

Auswertung

Die Negative dieser Bilder werden mittels eines Diaprojektors, welcher eine sehr starke Vergrößerung der Kurven erlaubt, ausgewertet. Sehr von Nutzen ist die im Oszillographen eingebaute Rasterbeleuchtung, mit welcher eine genaue Zentrierung des Bildes vorgenommen wird. Zur oberflächlichen Orientierung der Zeitverhältnisse haben wir uns Lineale angefertigt, die entsprechend dem gewählten Vergrößerungsmaßstab eine direkte Ablesung der Zeit von der vergrößerten Kurve erlauben. Zur genauen Untersuchung werden die auf der Leinwand gemessenen Größen auf die Bildschirmgröße zurückberechnet.

Formantfilterverstärker

Zur Aufzeichnung der Töne und ihre Zerlegung in die einzelnen Frequenzgruppen bedienen wir uns eines Spezialformantfilterverstärkers der Firma Knott. Die vom dynamischen Mikrophon, dessen Abstand zur Mundöffnung mittels Lineal konstant auf 30 cm gehalten wird, gelieferten Spannungen werden zunächst verstärkt. Die Verstärkung ist kontinuierlich verstellbar. Die verstärkte Spannung wird über Trennstufen gleichzeitig auf 8 Filter gegeben. Die Filter haben im Sperrgebiet eine Dämpfung von 55 db. DB (Abkürzung für Dezibel) ist eine Größe aus der Akustik, welche erlaubt zwei Schallintensitäten miteinander zu vergleichen. Schallintensität ist definiert als Leistung pro Fläche, ihre Einheit ist $\text{erg} \cdot \text{sec}^{-1} \text{cm}^{-2}$. Zum Vergleich zweier Schallintensitäten wurde als Nullpunkt $10^{-16} \text{ Watt/cm}^2$ gewählt. Diese Schallintensität stellt bei 1000 Hz die Hörschwelle dar. Db ist eine Verhältniszahl und zwar der zehnfache Logarithmus des Verhältnisses der vorkommenden Schallintensität zum Nullpunkt. Die Skala ist so aufgebaut, daß $\text{db} = 10 \log J_1/J_2$. J ist eine Abkürzung für Schallintensität.

Die gefilterten Sprachschwingungen werden dann direkt, d. h. ohne Unterlegung mit einer weiteren Spannung auf den Oszillographen geleitet und bei gleicher Verstärkung jeder einzelne Kanal gemessen. Folgende Frequenzbereiche können getrennt gemessen werden: 50-150 Hz, 150-300 Hz, 300-600 Hz, 600-900 Hz, 900-1250 Hz, 1250-1600 Hz, 1600-1900 Hz, 1900-2150 Hz, 2150-2400 Hz, 2400-1000 Hz.

Zur Messung der Energie der einzelnen Sprachschwingungen ist es möglich die gesiebten Frequenzen mit Gleichstrom zu unterlegen und so die Umhüllende direkt auf dem Oszillographen zu messen (Die Umhüllende ist die Linie, welche die einzelnen Amplitudenspitzen verbindet).

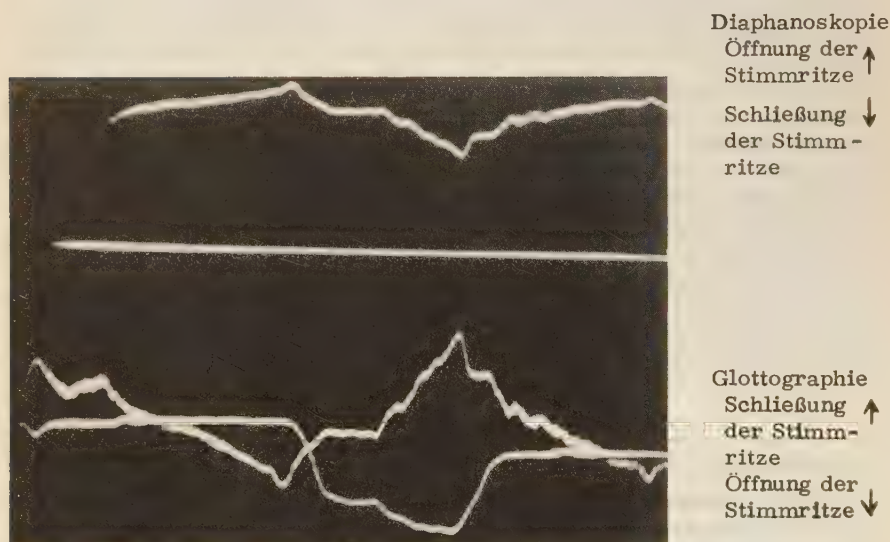
Diaphanoskopie

Bei der Diaphanoskopie handelt es sich um ein Prinzip, das schon einmal an einem Kehlkopfmodell und an herausgeschnittenen Kehlköpfen angewandt wurde. Eine Lichtquelle, welche sublottisch angebracht ist, wirft ein Licht durch die Rima glottidis. Über der Stimmritze befindet sich eine Photozelle und mißt das durchfallende Licht. Je nach Öffnungsweite des Spaltes wird die Lichtmenge verschieden sein.

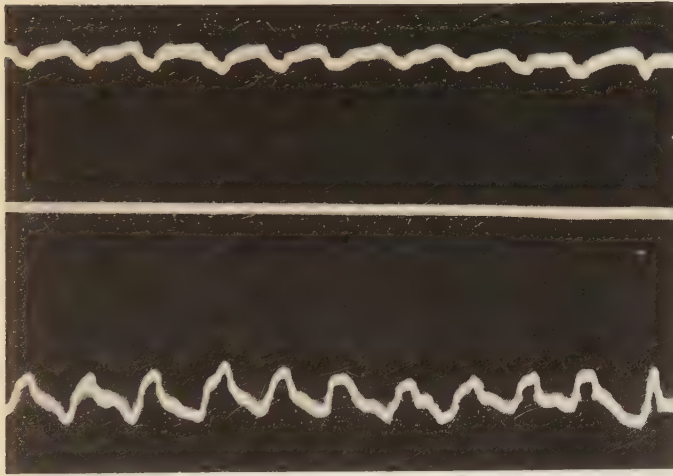
Wir setzten unsere Lichtquelle, eine Glühbirne von 15 Watt Leistung bei einer Spannung von nur 10 Volt, im Jugulum unter der Cart. cricoidea auf die Haut. Über der Birne war ein Lichtschacht aus Gummi angebracht, so daß der Abstand Haut-Birne 1,5 cm betrug. Der Lichtschacht wurde mit mäßigem Druck auf die Haut aufgesetzt.

Das Photoelement war auf einen kleinen Stiel angeschraubt und befand sich supraglottisch. Die ausgesandten Stromstöße wurden in einem Gleichstromverstärker verstärkt und auf den Oszillographen geleitet. Der Vergleich der diaphanoskopischen Kurve mit dem gleichzeitig geschriebenen Glottogramm ergibt folgendes:

- 1) Der Anstieg des Glottogrammes beginnt knapp vor dem des Diaphanoscops.
- 2) Das Maximum der Diaphanoskopie ist kurz vor dem des Glottogrammes erreicht. Diese beiden Tatsachen erklären sich aus dem inneren Umbau der Stimmlippen, der äußerlich noch nicht zu erkennen ist.



Respiratorisches Glottogramm und Diaphanoskopiekurve bei Phonation



Diaphanoskopie

Öffnung der
Stimmritze ↑

Schließung
der Stimm-
ritze ↓

Glottographie
Schließung der
Stimmritze ↑

Öffnung der
Stimmritze ↓

Respiratorisches Glottogramm und Diaphanoskopiekurve beim Hecheln

Exstirpierter Kehlkopf

An einem exstirpiertem Kehlkopf mit normalen Stimmlippen werden unmittelbar nach der Operation auf beiden Seiten der Cart. thyreoidea Elektroden angelegt und so ein Glottogramm angefertigt. Die Stimmlippen werden mechanisch durch Fadenzug bewegt. Es zeigt sich das gewohnte Bild. Beim Zusammenführen der Stimmlippen steigen die Kurven an, gleichbedeutend einer Abnahme des Widerstandes, und beim Auseinanderziehen ist ein Abstieg der Kurven zu sehen. Die Möglichkeit dieser experimentellen Untersuchung ist zeitlich sehr begrenzt, denn bereits 1.5 Stunden nach der Exstirpation treten Störungen in den Kurven auf. Zunächst sind es Ausfallerscheinungen derart, daß auf ein Zusammenziehen der Stimmlippen nur ein kurzer Anstieg folgt, der alsbald wieder zur Nulllinie führt. Später ist kein sehr deutlicher Anstieg mehr zu verzeichnen.

Fehlermöglichkeiten

Ein Anlegen der Elektroden über oder unter der richtigen Stelle führt zu Kurven, die meist sehr klein sind und von der gewöhnlichen Form stark abweichen.

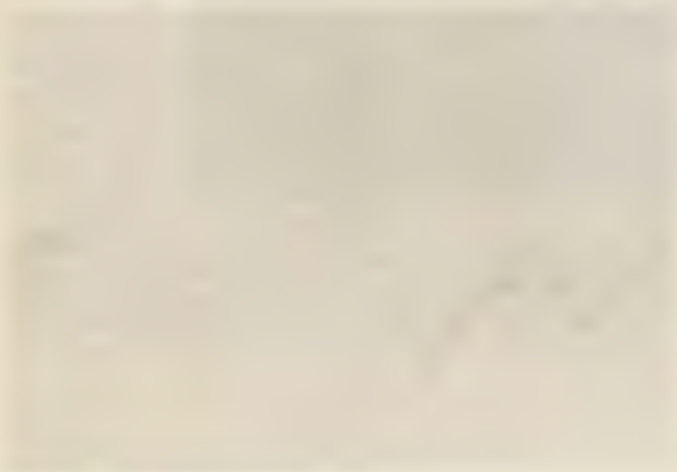
Der Kopf muß während der Untersuchung ruhig gehalten werden, denn bei Bewegungen kommt es zu Widerstandsveränderungen in den Muskeln der Umgebung und damit zu einer Verfälschung der Ergebnisse. Besonders zu beachten ist dies bei Patienten mit Lähmungen, welche bei der Phonation gern den Kopf rückwärts beugen.

Bei Frauen sind die Ausschläge im allgemeinen etwas kleiner, was wohl mit der geringeren Masse zusammenhängt.

ERGEBNISSE BEI NORMALEN STIMMLIPPEN

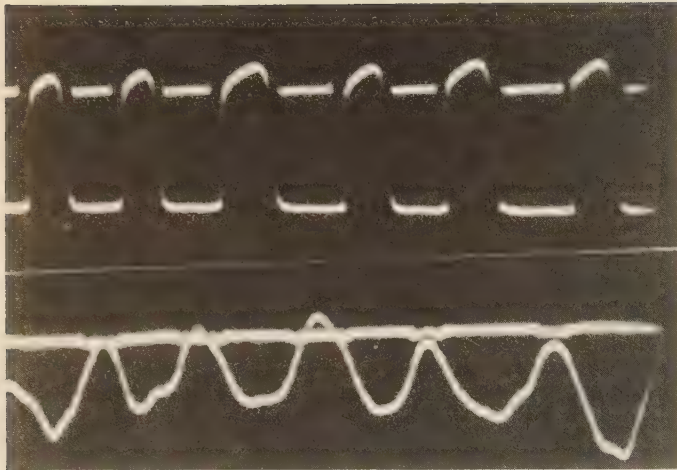
Ruhige Atmung

Die ruhige Atmung hat Philippe FABRE in seiner ersten Arbeit über die Glottographie, welche er 1957 veröffentlichte, beschrieben. Nach seinen Angaben fällt das Maximum der Glottisöffnung mit der maximalen Erweiterung des Brustkorbes zusammen. Dieses inspiratorische Maximum des Thorax bleibt noch einen Augenblick bestehen, während sich die Glottis bereits wieder zu schließen beginnt. Bei der Expiration läuft der Vorgang in umgekehrter Weise ab.



Glottographie
Schließung
der Stimm- ↑
ritze
Öffnung der
Stimmritze ↓

Ruhige Atmung
Originalglottogramm von FABRE



Druck in der
Mundhöhle

Zunahme ↑

Abnahme ↓

Glottographie

Schließung
der Stimm-
ritze ↑

Öffnung der
Stimmritze ↓

Gilt für alle
Photographien

Ruhige Atmung
Respiratorisches Glottogramm

Unsere Ableitungen zeigen ein ähnliches Bild, wenngleich einige Unterschiede zu den Ableitungen von FABRE bestehen. Bei der Einatmung erfolgt ein stetig fortschreitendes Öffnen der Glottis, welches bereits während der Umkehrpause von Ausatmung zu Einatmung einsetzt. Das Photo zeigt die Atmung bei einer gesunden jungen Person, die allerdings unter den Versuchsbedingungen etwas rasch atmet. Ziemlich genau in der Mitte zwischen Ausatmungs- und Einatmungsperiode, einem Zeitpunkt, wo keinerlei Luftbewegung auftritt, beginnt bereits die weitere Öffnung der Stimmlippen, welche mit der Beendigung der Einatmungsphase ihr Maximum erreicht, welches ebenfalls in der Mitte zwischen Einatmung und der nun folgenden Ausatmung liegt. Die von FABRE aufgezeichnete respiratorische Glottographie zeigt im Vergleich mit unserer einen ungleichmäßigen Verlauf, während unsere Kurven Sinuskurven ähnlich sind. Das Maximum der Glottisöffnung und Schließung stimmt mit unseren Maxima überein.

Wir sehen im Zusammenfall der maximalen Öffnung und Schließung der Stimmlippen mit den Umkehrpunkten der Luftbewegung eine Folge des Hering-Breuer-Reflexes, der in der Regulation der Atmung eine große Rolle spielt. In den Wänden der Alveolargänge sitzen Dehnungsrezeptoren, die bei einer Erweiterung der Alveolen über den N. vagus ihre Efferenzen zum Atemzentrum zentripetal schicken. Diese Impulse hemmen das Inspirationszentrum und können bei forcierter Atmung auch das Expirationszentrum erregen. Umgekehrt wird das Inspirationszentrum bei Ausatmung und einer damit verbundenen Entspannung der Lungen gereizt. Diese Impulse setzen bereits bei Beginn der jeweiligen Atmungsphase ein und erreichen zur Luftströmungsumkehr ihr Maximum. Bei der Ausatmung fällt durch die nachlassende Luftströmung der subglottische Druck und damit wird die auseinanderdrängende Kraft der Luftbewegung geringer, so daß sich jetzt ein engeres Zusammengehen der Stimmlippen einstellt. Dementsprechend ist der Druckverlauf in unserer Photographie, welche gegen Ende der Ausatmung einen Übergang von steilen in einen flacheren Anstieg zeigt.

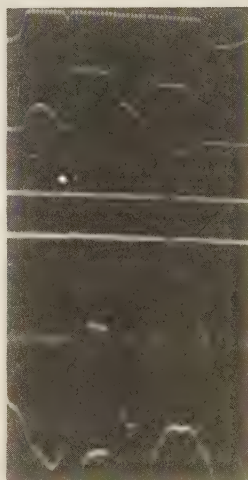
Hecheln

Das Hecheln zeigt ein Bild ähnlich dem ruhigen Atmen, jedoch ist der Quotient Expirationszeit/Inspirationszeit, welcher bei normaler Atmung bei 0,8 liegt, erhöht auf Werte um 1,5. Der Druck in der Mundhöhle steigt bis zur Umkehr von Ausatmung zur Einatmung in einem steilen Verlauf mit einem Knick in den Extremstellungen. Nach längerem Hecheln wird die Frequenz der Atemzüge zunehmend geringer und ähnelt wieder dem Verlauf bei ruhiger Atmung, eine Folge der raschen Abrauchung von Kohlendioxyd und einer daraus entstehenden respiratorischen Alkalose, welche das Atemzentrum weniger erregt.

Husten

Der Husten, bei welchem das Glottogramm und der labiale Luftstrom gemessen wird, hat ein Verhältnis Expirationszeit / Inspirationszeit von ungefähr 2-3. Es folgt immer eine Gruppe von Luftstößen, wobei im Verlauf einer solchen Gruppe der Luftdruck linear absinkt. Es ist dies eine Folge des Luftverbrauchs für die rasche Ausatmung, so daß für die letzten Luftstöße nicht mehr genügend Luft zur Verfügung steht.

Der Luftstrom selbst tritt etwa in der Mitte des Anstieges des Glottogrammes auf und erreicht sehr schnell sein Maximum. Die Steilheit der Luftdruckkurve hat einen Sinuswert von 0,99 bis nahezu 1, entsprechend einem Winkel von $80-90^{\circ}$. Auf den raschen Anstieg des Luftdruckes folgt sodann ein kleines Plateau. Während dieser Zeit erfolgt keine Veränderung der Strömungsverhältnisse und es bleibt der maximale Hochdruck bestehen. In dieser Phase beginnt sich die Stimmritze wieder zu schließen und es folgt ein rascher Druckabfall. Diaphanoskopische Untersuchungen zeigen ebenfalls einen vollständigen Schluß der Stimmritze.



Druck in der
Mundhöhle
Zunahme
Abnahme

Glottographie

Respiratorisches Glottogramm und Druckkurve in der Mundhöhle bei Husten.

Das Photo zeigt eine Gruppe solcher Luftstöße und das dazugehörige Glottogramm.

Gähnen

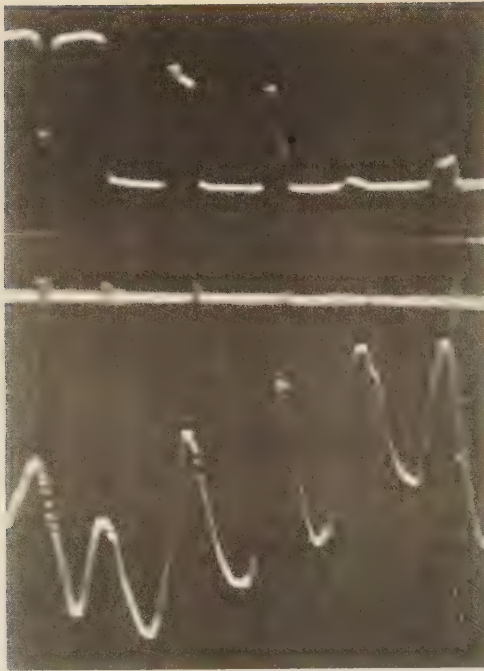
Das Gähnen beginnt mit einem raschen Schluß der Glottis, der langsam flacher wird.

Gegen Ende des Anstieges der respiratorischen Glottographie setzt in der Mundhöhle ein maximaler Luftstrom ein, der im folgenden langsam abfällt. Gleichzeitig mit dem Abfall des Luftdruckes beginnt eine Öffnung der Stimmritze, der ein erneuter langsamer Anstieg des Glottogrammes folgt. Die Phonation beginnt im unteren Drittel des Glottogrammes.

Lauthaftes Lachen

Das lauthafte Lachen besteht aus einzelnen kurzen Luftstößen mit einer geringen Phonation im Höhepunkt des Luftdruckverlaufes. Das Glottogramm klettert während einer Lachsalve langsam hoch und erreicht im allgemeinen nach 6 bis 7 Luftstößen seinen Höhepunkt. Es folgt ein abrupter Abfall entsprechend einer maximalen elektrischen Widerstandszunahme, die ja gleichbedeutend ist mit einer Öffnung der Stimmritze.

In den hohen Frequenzen fallen die Amplituden, aufgezeichnet von dem Frequenzanalysator, sehr rasch auf die Größe 0 zurück. Das bedeutet, daß der Dämpfungsfaktor gegenüber der Norm erhöht ist. Die Schwingungen unterliegen einer Dämpfung, die der augenblicklichen Geschwindigkeit dx/dt proportional und entgegengesetzt ist. Auf den schwingenden Körper wirken also einmal die ihn in seine Ruhelage zurücktreibende Kraft und eine Kraft, welcher der ersteren entgegengesetzt ist. Die Abnahme der Amplituden kann sowohl auf einer Zunahme des Reibungskoeffizienten als auch einer Abnahme der schwingenden Masse begründet sein. Vergleiche zwischen der Grundfrequenz, welche je nach Geschlecht und Person zwischen 150 und 350 Hz liegt, und Schwingungen der Obertöne zeigen, daß zwischen den Phasendifferenzen kein konstantes Verhältnis besteht. Daraus kann gefolgert werden, daß die Obertöne nicht mittels der Stimmlippen entstehen und im Ansatzrohr durch Resonanz verstärkt werden, da die Phasendifferenz bei Resonanz $\pi/2$ beträgt. Es kann sich hier um ein Anblasephänomen handeln, was bedeutet, daß die Obertöne erst im Ansatzrohr selbst entstehen und nicht in den Schwingungen, welche von den Stimmlippen abgehen, enthalten sind.



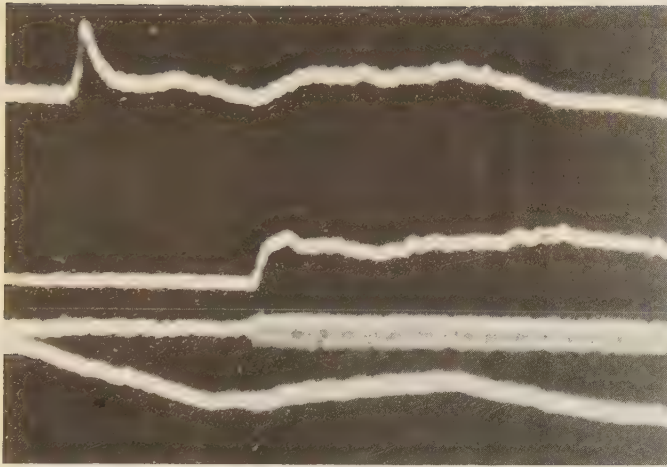
Druck in der
Mundhöhle
Zunahme
Abnahme

Glottographie

Respiratorisches Glottogramm und Luftdruckverlauf in der Mundhöhle bei lauthaftem Lachen

Betontes Sprechen

Schon TRENDELENBURG hat beim betonten Sprechen kurz vor dem eigentlichen Stimmbeginn eine Gruppe sehr hoch frequenter Schwingungen gesehen. Nach seiner Erklärung sind dies Wirbelbildungen an der Epiglottis. Diese Art von Schwingungen zeigt sich auch in unseren Kurven, und zwar während der schnellen Schließung vorhergehender Öffnungsbewegung der Stimmlippen. Im phonatorischen Glottogramm sind auf einigen Bildern, die aber die Minderheit bilden, in zeitlicher Coinzidenz mit diesen hohen Frequenzen minimalste Schwingungen der Stimmlippen zu sehen. Dennoch glauben wir an die Theorie der Wirbelbildung, wahrscheinlich an den Stimmlippen.



2400-10000 Hz

50 - 150 Hz

phonatorische
Glottographierespiratorische
Glottographie

Glottogramm und Phonogramm beim betonten Aussprechen des Wortes Apfel

Wie aus der Photographie zu ersehen ist, endigt dieses Phänomen mit der fortschreitenden Öffnung der Stimmlippen. Die Frequenz von Spalttönen hängt von der Strömungsgeschwindigkeit der Luft ab. Diese wiederum nimmt im Verlauf der Öffnung der Stimmlippen ab, womit die Bedingungen für eine Wirbelbildung ungünstiger wird.

Die Phonation selbst beginnt wieder mit dem Anstieg des Glottogrammes und endigt mit der vollständigen Schließung der Glottis. Besteht das Wort aus zwei Silben, so ist zwischen der ersten und zweiten Silbe meist ein abruptes Öffnen und ein ebenso schnelles Schließen zu beobachten.

Weicher Stimmeinsatz

Beim weichen Stimmeinsatz zeigt das respiratorische Glottogramm nur einen flachen Anstieg, die Stimmlippen kommen also nur verhältnismäßig langsam einander näher. 30-120 msec vor dem Auftreten der Luftschwingungen sind drei oder vier kleine Ausschläge im phonatorischen Glottogramm zu erkennen. Der Phonationsbeginn selbst liegt im unteren Teil des Kurvenanstiegs, setzt also schon sehr früh ein. Die tiefen Frequenzen (50-300 Hz) erreichen ihre größte Amplitude nur sehr langsam, während die hohen Frequenzen von vornherein ihr Maximum haben.

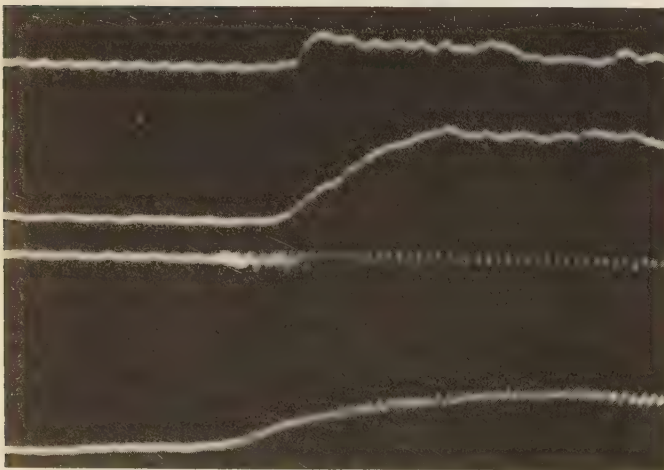
FABRE beschreibt ein gleiches Verhalten bei seinen Untersuchungen.

1250-1600 Hz

50 - 150 Hz

phonatorische
Glottographie

respiratorische
Glottographie



Glottogramm und Phonogramm bei Phonation des Wortes *Ehre* bei weichem Stimmeinsatz

Harter Stimmeinsatz

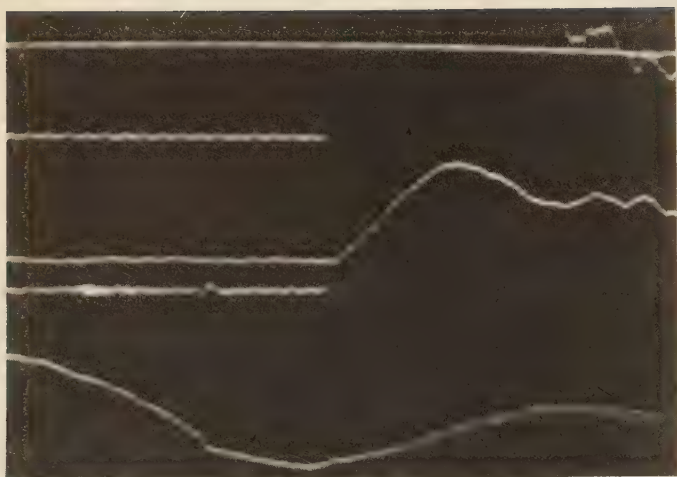
Phonation und rasche Schwingungen der Stimmlippen fallen beim harten Stimmeinsatz zeitlich zusammen. Die phonatorischen Oszillationen beginnen mit einem Maximum, das von einem baldigen Abfall der Amplitude gefolgt ist. Dementsprechend verläuft die Kurve der Grundfrequenz des entsprechenden Wortes.

FABRE konnte beim harten Stimmeinsatz vor dem Beginn der Phonation geringe Ausschläge in der phonatorischen Glottographie zeigen und spricht von präparatorischen Oszillationen. Er bringt sie in Zusammenhang mit der muskulären Konstriktion, als deren Folge er die Stimmritzenverengung betrachtet. Um diese Ausschläge zu sehen, müssen wir unsere Ableitungen sehr hoch verstärken, so daß auch die Eigenschwingungen der Röhren zu erkennen sind, was uns die Entscheidung, ob Oszillationen der Stimmlippen oder Eigenschwingungen der Röhren vorliegen, schwer macht. Die elektromyographischen Ableitungen von BUCHTHAL und FAABORG-ANDERSEN bestätigen die Ergebnisse von FABRE.

BUCHTHAL und FAABORG-ANDERSEN haben in den M. vocalis eine Elektrode gelegt und damit das elektrische Potential vor, während und nach der Phonation gemessen. Sie beschreiben eine Zunahme der Entladungen etwa 100-200 msec vor dem Beginn der Phonation, während welcher die Aktivität nachläßt. Hierauf erfolgt eine erneute Zunahme der Entladungen. Dem harten Stimmeinsatz gehen keine Oszillationen unmittelbar vor dem Sprengen der Stimmlippen voraus. Dagegen sieht man etwa 120 msec vorher eine geringe Anzahl von Ausschlägen, die wohl FABREs präparatorischen Oszillationen entsprechen.

1250-1600 Hz

50 - 150 Hz

phonatorische
Glottographierespiratorische
Glottographie

Glottogramm und Phonogramm bei Phonation des Wortes Ehre bei hartem Stimmeinsatz

Valsalva-Preßversuch

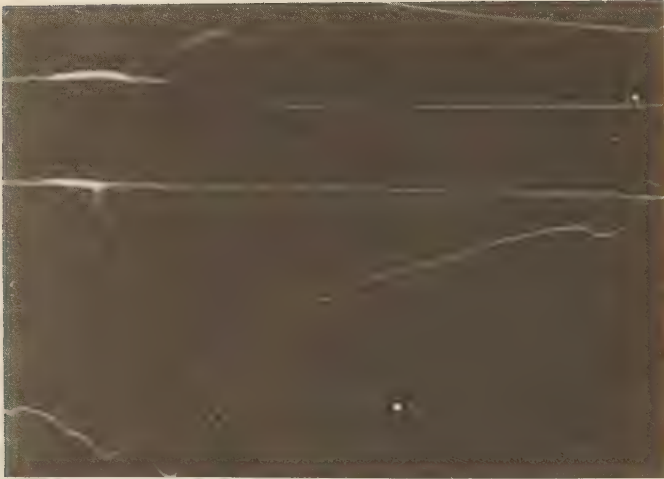
Beim Preßversuch nach VALSALVA ist der Druckverlauf erwartungsgemäß. Die Glottis schließt sich sehr rasch nach einem kurzen Luftholen der Vp, doch treten bereits unmittelbar nach diesem Schluß Schwankungen im elektrischen Widerstand der Stimmlippen auf, die von sehr geringem Ausmaß sind und wohl der ständigen Innervation der schnellen Kehlkopfmuskeln entsprechen. Streng davon abzutrennen sind Widerstandsänderungen, die auf Bewegungen der Vp beruhen und durch passive Ruhigstellung des Kopfes ausgeschaltet werden können.

Bei einem Teil der Vp sehen wir einen langsamen Abfall des Glottogrammes, der sofort von einem erneuten Anstieg abgelöst wird. Gegen Ende des Versuches fallen Druck und Glottogramm maximal ab.

Diaphanoskopisch ist dieser Versuch rein technisch nicht zu untersuchen.

Der zwischenzeitliche Abfall des Glottogrammes kann als Reflex erklärt werden. Der Muskeltonus in den betreffenden Muskeln läßt nach der initialen maximalen Anspannung etwas nach, es kommt zu einer geringen Massenverschiebung vielleicht auch zu einer Emporwölbung der Stimmlippen. Diese Massenverlagerung kann reflektorisch zu einer verstärkten Innervation und damit zu einer Verfestigung des Glottisschlusses führen.

Das nachfolgende Bild zeigt einen typischen Ablauf des Preßversuches nach VALSALVA.



Druck in
der
Mundhöhle

Glottog-
raphie

Respiratorisches Glottogramm und Luftdruckverlauf in der Mundhöhle
beim Preßversuch nach VALSALVA

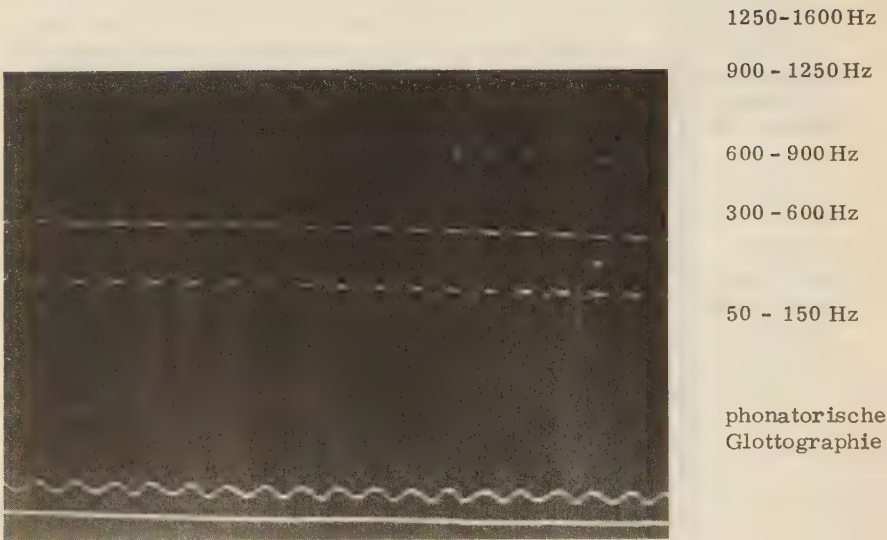
Bei einigen Probanden treten kurze phonatorische Oszillationen ohne entsprechende Druckveränderungen auf. Sie fallen zeitlich mit der Abnahme des Widerstandes zusammen. Mit diesem Befund stehen auch die EMG-Ableitungen des *M. vocalis* von WUSTROW in Einklang. Er beobachtete beim geschlossenen Kehlkopf eine Vermehrung der EMG-Aktivität bei der Einstellung der Phonation. Bei der Phonation selbst nimmt die Aktivität wieder ab. Wir dürfen dies auch für den Valsalva annehmen.

Gedecktes Singen

Das gedeckte Singen zeigt gegenüber dem offenen Singen ein stärkeres Auftreten der hohen Frequenzen. Im Glottogramm ist kein wesentlicher Unterschied zu erkennen. Ähnlich ist die Stimme bei gleichzeitiger Anbietung des Gesprochenen mittels Kopfhörer. Die Stimme wird leiser, die hohen Frequenzen nehmen zu. Werden die gesiebten Frequenzen mit Gleichstrom unterlegt und die "Umhüllende" der Ausschläge auf dem Oszilloskop abgebildet, so haben wir ein direktes Maß für die Energie, die in beiden Fällen in den hohen Frequenzbereichen etwa gleich ist, in den unteren Frequenzbereichen beim gedeckten Singen eine Abnahme zeigt.

Vokale

Die Vokale haben wir mit einer Geschwindigkeit von 3-1 msec entsprechend einem cm auf dem Bildschirm abgebildet. Das Bild zeigt das phonatorische Glottogramm beim Vokal A.



Glottogramm bei gehaltener Phonation des Vokales A mit tiefer Frequenz

Wie auf dem Bild zu sehen ist, handelt es sich um einen periodischen Vorgang, der in seiner Grundform eine Sinuskurve darstellt. Diese Kurve variiert je nach der Tonhöhe, wobei mit zunehmender Tonhöhe die Abweichung von der reinen Sinusform zunimmt.

Die Sinusschwingung ist die Folge der Massenverlagerungen während einer Stimmlippenbewegung. Während sich die Stimmlippen bereits berühren, sind die Massen im Innern der Stimmbänder noch nicht zur Ruhe gekommen, sondern bewegen sich noch auf die Mitte zu um von dort gleich wieder zurückzufluten. Die Bilder gleichen sich bei den einzelnen Vokalen ziemlich, die Schwingungen selbst sind während der ganzen Phonation ungedämpft.

Die Sinuskurve zeigt, daß hier eine harmonische Schwingung vorliegt, welche eine zurücktreibende Kraft, die der Bewegung des schwingenden Punktes entgegengesetzt ist, voraussetzt. Diese Kraft ist eine Folge der Spannung und der damit auftretenden Elastizität der Stimmlippen.

Die mathematische Formel für eine harmonische Schwingung lautet

$$y = b \cdot \sin \omega \cdot t$$

Die rücktreibende Kraft ist der Elongation proportional, es ist also $K = k \cdot y$. Bei der Gleichsetzung der maximalen kinetischen Energie und der potentiellen Energie ergibt sich für die Frequenz die Abhän-

$$\text{gigkeit} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (v = \text{Frequenz, } K = \text{Kraft, } M = \text{Masse}).$$

Die Stimmlippen können gemäß dieser Formel ihre Frequenz durch Veränderung der Spannung oder der Masse einstellen. So erklärt sich die Frequenzzunahme im Falsett trotz stroboskopisch zu sehender nachlassender Spannung der Stimmlippenränder. Mit steigender Tonhöhe schwindet die Sinusform und an ihre Stelle tritt eine neue periodische Kurve. Die Periodizität legt die Vermutung nahe, daß es sich hier um eine Schwingung, die aus mehreren harmonischen Schwingen zusammengesetzt ist, handelt.



1250-1600 Hz

900 - 1250 Hz

300 - 600 Hz

50 - 150 Hz

phonatorische
Glottographie

Glottogramm bei gehaltener Phonation des Vokales A mit hoher Frequenz

Das vorherige Bild zeigt den Vokal A in hoher Stimmlage. Um die Kurve in ihre Einzelbestandteile aufzulösen, haben wir sie durch unseren Formantfilterverstärker geschickt. Die verstärkten glottographischen Schwingungen haben wir sowohl direkt auf den Oszillographen geleitet als auch auf den Eingang des Filters, in welchem das Glottogramm in einzelne Frequenzbereiche aufgeschlüsselt wird und die in den jeweiligen Frequenzbereich fallende Schwingungen getrennt auf den Oszillographen weitergegeben werden. Die Kurve besteht aus einer Grundfrequenz, die je nach der Tonhöhe zwischen 100 und 500 Hz liegt. Daneben kommen noch höhere Frequenzen vor. Die Amplitudenweite dieser hohen Schwingungen ist gegenüber den niederfrequenten gering. Die Schwingungen sind wie das Glottogramm in kleine Gruppen aufgeteilt und untereinander vollkommen synchron. Eine Frequenzanalyse der Stimme bei der gleichen Vp mit gleichen Vokal in der gleichen Tonlage zeigt ein ähnliches Bild. Es sind also die Obertöne bereits in den Bewegungen der Stimmlippen enthalten.

FABRE hat sich sehr ausgiebig mit der Glottographie bei gehaltenen Vokalen beschäftigt und dabei Bilder gezeigt, denen unsere eigenen Aufzeichnungen nicht immer gleich sind.

Wie bereits angeführt unterscheidet sich nach FABRE der Phonationsbeginn beim Vokal A von allen anderen Vokalen durch seinen frühen zeitlichen Einsatz. Bereits am Beginn des Anstiegs der respiratorischen Glottographie, also bei einer noch weit geöffneten Stimmritze, ist der Vokal A hörbar. Bei den anderen Vokalen liegt der Beginn der Phonation, gemessen an der Stimmritzenweite, erst später. Es läßt sich zwischen den einzelnen Vokalen keine Differenz in den zeitlichen Verhältnissen feststellen.

Wir haben unsere Ableitungen auf dieses von FABRE beschriebene Phänomen hin sehr genau durchgesehen, konnten aber einen auffallenden Unterschied zwischen dem Vokal A und den übrigen Vokalen nicht feststellen. Es liegt wohl der Phonationsbeginn für die Vokale im unteren Teil des Anstiegs der respiratorischen Glottographie, doch läßt sich kein konstantes Verhältnis von Stimmritzenweite zu Phonationsbeginn bei den einzelnen Vokalen bestimmen. Die Vokale verhalten sich auf unseren Kurven alle gleich.

Bei seinen Untersuchungen über die Bruststimme hat FABRE aufgezeigt, daß sich die Frequenzen von Phonogramm und Glottogramm unterscheiden. Die Frequenz des Phonogramms ist genau doppelt der des Glottogramms. FABRE sieht darin eine Bestätigung der Helmholtzschen Resonanztheorie. Die Versuchsperson stellt dabei, wie oben ausgeführt, ihre Stimme auf den 2. harmonischen Ton der glottischen Basis ein, da die Identifikation eines Tones auf einer Analyse der Obertöne beruht. Es wird dabei der Pharynx und die Mundhöhle so eingestellt, daß gerade der 2. harmonische Ton der Stimmlippenschwingungen besonders verstärkt wird. Andererseits beschreibt FABRE in seiner Abhandlung über

die Bruststimme ein synchrones Übereinstimmen des Phonogramms mit dem Glottogramm, während bei einer Kastratenstimme eine Phasendifferenz auftritt. Danach ist bei der Stimme im Brustregister eine Verstärkung durch Resonanz ausgeschlossen, da eine Schwingung in Resonanz zu einer primären Frequenz stets eine Phasendifferenz von $\pi/2$ zu der sie erregenden Schwingung aufweist.

Auch hier sind unsere Ergebnisse von denen FABREs unterschieden. Wir finden im Phonogramm eine Tonfrequenz, die mit der Frequenz der phonatorischen Glottographie übereinstimmt. Die sich auf den Grundton aufbauenden Obertöne sind, wie oben dargetan, bereits in den Bewegungen der Stimmlippen enthalten, so daß auch wir die Helmholtzsche Theorie stützen können, ein Punkt, in dem wir mit FABRE einig gehen.

ERGEBNISSE BEI LÄHMUNGEN DER STIMMLIPPEN

Die Stimmbandlähmungen werden nach der Stellung der Stimmlippen in der Ruhe in drei Klassen eingeteilt.

1. Medianstellung,
2. Paramedianstellung,
3. Intermediärstellung.

Einige Autoren unterscheiden noch eine Prälateral- und Lateralstellung, die aber nur bei tiefer Inspiration vorkommen.

Ad 1: Die Stimmstörungen bei der Medianstellung sind außerordentlich variabel und reichen von der leisen kaum erkennbaren bis zur stärkeren Störung. SPIESS und SEEMAN erkannten bei einseitigem Ausfall eine Niveaudifferenz zwischen der gesunden und kranken Stimmlippe. Außerdem sahen sie eine Excavation des gelähmten Stimmbandes, konnten aber stroboskopisch keinen auffallenden Befund erheben, insbesondere war keine Arrhythmie im Schwingungsablauf zu sehen. Nach LUCHSINGER, JESCHEK und HOFER tritt diese Art der Lähmung nach vollständiger Durchtrennung des N. laryn. caudalis ein.

Bei beidseitigem Befall ist die Stimmritze auf einen kleinen Spalt verengt und die Atmung schwer behindert. Es besteht eine hochgradige inspiratorische Dyspnoe.

Ad 2: Die Paramedianstellung ist eine Folge einer totalen Leitungsunterbrechung des N. recurrens, wie MÖLLER an seinen Tierexperimenten zeigen konnte. Bei akutem Eintritt der Erkrankung kann die Glottis nicht mehr genügend geschlossen werden und es wird beim Sprechen viel Luft verwendet. Zugleich besteht eine Atemnot. Durch die Kompensation der gesunden Seite kommt es zur Flotterstimme. Es verbessert sich der Befund weiter und schließlich verfügt der Patient wieder über eine brauchbare Stimme.

Ein ähnliches Bild entsteht beim Spasmus des M. cricoarytaenoideus lat. und des M. arytaenoideus und auch bei Posticuslähmungen. Stroboskopisch kann man vom Fehlen jeglicher Schwingung mit stärkster Spannung bis zur verstärkten Schwingung jedes Bild sehen. Die verstärkte Schwingung kann zu einem Aufschlagen der Schwingungsbräuche nach medial und lateral führen. Bei beidseitiger Paramedianstellung ist die Stimme erhalten, sie kann gering heiser klingen.

Ad 3: Die Intermediärstellung tritt bei Ausfall des N. recurrens und des R. externus des N. laryng. cranialis ein oder bei Unterbrechung des Vagus vor Abgang des N. laryn. cranialis. Bei der Laryngoskopie sieht man ein schlaffes Stimmband, das entsprechend dem Luftstrom eine Exkavation aufweisen kann. Der Processus vocalis ist nach lateral gedreht und sehr schwer zu sehen, weil die Plica aryepiglottica nach vorne

und medial hängt. Die Schwingungen zeigen eine vorwiegend vertikale Komponente. Die Stimme ist aphonisch, jedoch kann es später bei einseitiger Lähmung zu einer Kompensation kommen, indem sich bei der Phonation die gesunde Stimmlippe an die gelähmte heranbewegt, die Mittellinie überschreitet und sich die Aryknorpel überkreuzen. Die Stimme ist dann klangarm. Maßgebend für den Zustand der Lippen ist der Spannungszustand des Stimmbandes. Die Schwingungen selbst sind von Spannungszustand und der Stellung des Stimmbandes, in welcher dieses fixiert ist, abhängig. Die glottographische Untersuchung bei beidseitigen Paresen ergibt ein sehr auffälliges Bild. Bei allen Sprechversuchen, die beim Patienten mit einer gewissen Mühe verbunden sind, tritt vor der Phonation ein Nähern der Stimmlippen auf. Im Augenblick des Phonationsbeginnes gehen diese initial schnell und dann langsamer auseinander.

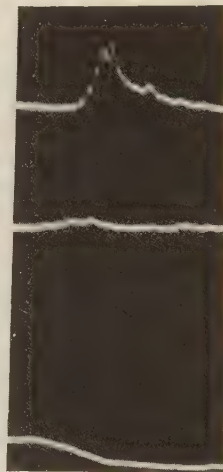
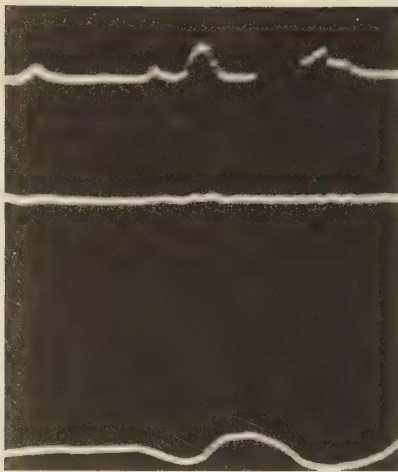
Die respiratorische Glottographie ist ganz allgemein abgeflacht und zeigt geringe Bewegungen an. Die Brust- und Mittellinie zeigen ein ziemlich ähnliches Bild, dagegen war die Frequenzverteilung der Kopfstimme sehr weitgehend vom Zeitpunkt des Sprachvorganges abhängig. Vor dem Beginn der Luftschwingungen steigt das respiratorische Glottogramm verhältnismäßig steil an, fällt dann aber etwas flacher ab und von diesem Augenblick an können Luftschwingungen registriert werden. Zuerst sind verhältnismäßig hohe Frequenzen, etwa 2 - 3000 Hz zu erkennen, die aber rasch an Frequenz und Amplitude abnehmen, während die Schwingungen zwischen 50 und 300 Hz eine Zunahme aufweisen. Mit dem Ende der Phonation nähern sich die Stimmlippen wieder einander. Eine phonatorische Glottographie war nicht zu messen.

Eine Deutung dieses Befundes ergibt sich aus den geschilderten Spannungsmöglichkeiten der Stimmlippen von außen. So zeigt die vor der Phonation ansteigende Glottographie ein Nähern der Stimmlippen, welches durch die Muskelwirkung des M. cricothyreoideus und M. thyropharyngius sowie der Zugwirkung der Fasern des Ösophagus, die an der Hinterfläche der Aryknorpel und Ringknorpelplatte ansetzen, bewirkt wird.

Wird während der Untersuchung gegen das Spatium cricothyreoideum gedrückt und werden damit die Stimmlippen verkürzt, so wird die Stimme dysphonisch und erschwert. Es gelingt aber nicht die Stimme aphonisch zu machen. Bei Versuchen an exstirpierten Kehlköpfen gelingt es durch massives Zusammendrücken des Kehlkopfes die Stimmbänder in Paramedianstellung zu bringen. Es kann auch experimentell bewiesen werden, daß durch maximale Kontraktion des M. cricothyreoideus die Stimmlippen in Medianstellung gebracht werden können. Die Frequenzabnahme während des Sprechens ist eine Folge der Verringerung der Direktionskraft, welche nach der Formel $T = 2\pi\sqrt{\frac{M}{K}}$ (T = Schwingungs-

dauer, M = Masse, K = Kraft) die Schwingungsdauer berechnen läßt. Durch den Ausfall der Innervation des *M. vocalis* ist keine Massenschiebung in den Stimmlippen möglich und daher die schwingende Masse ohne Einfluß auf die Frequenzänderung.

50-150 Hz



phonatori-
sche Glotto-
graphie

respirato-
rische
Glotto-
graphie

Respiratorisches Glottogramm bei beidseitiger Recurrensparese

Das Photo zeigt den Ablauf der Phonation bei einer beidseitigen Parese. Beim Lachen sinkt die Durchlässigkeit der Stimmlippen für den elektrischen Strom schlagartig ab, was einer ebenso schnellen Öffnung entspricht und in diesem Zeitpunkt kann ein Luftstoß aufgezeichnet werden. Das Zahlenverhältnis zwischen Öffnung und Schließung beträgt 3 : 8. Auch hier fallen die hohen Frequenzen rasch ab.

Das betonte Sprechen beginnt wieder mit hochfrequenten Schwingungen vor dem eigentlichen Sprechen. Sie fallen eindeutig mit dem Öffnen der Glottis zusammen, was wiederum als Beweis für die Entstehung dieser Pfeiftöne an der Stimmritze angeführt werden kann.

Versucht der Patient laut zu sprechen, so sind die Schwingungen zwischen 1900 und 10 000 Hz von längerer Zeitdauer, doch ist der Energieinhalt dieser Schwingungen gemessen durch die Einhüllende der Amplituden in beiden Fällen etwa gleich.

Die einseitige Parese zeigt im allgemeinen kleine Ausschläge, doch ist der Phonationsbeginn wieder mit einer Schließung oder zumindest einem Zusammenrücken der Stimmlippen verbunden.

Die Bilder der Brust-, Mittel- und Kopfstimme zeigen wenig Auffälligkeiten.

Bei der schnellen Aufzeichnung (3 msec/cm auf dem Bildschirm) kommen mitunter folgende Kurven vor:



Phonatorisches Glottogramm bei einseitiger Recurrensparese

Die Amplitude ist etwas kleiner als normal, die unregelmäßigen Komplexe übersteigen die Schwingungsweite der normal ablaufenden Gruppen. Das Bild ist eine Folge der normalen Schwingungen des gesunden Stimmbandes, welches gegen das gelähmte wie auf ein Widerlager aufschlägt. Die gelähmte Lippe kommt dadurch zum Schwingen und es resultiert die unsymmetrische Schwingungsfolge.

SCHOENHÄRL hat im Jahre 1963 auf diese Schwingung hingewiesen.

Die ersten Ausschläge beim harten Stimmeinsatz sind regelmäßig, werden aber rasch kleiner und gehen in einen Komplex mit Arrhythmien über, an den sich spontan wieder regelmäßige Schwingungen anschließen.

Beim weichen Stimmeinsatz dagegen zeigt die Glottographie ein weitgehend normal aussehendes Bild. Die phonatorischen Oszillationen sind von Anfang an geringer und gleichmäßiger. Wohl treten noch Arrhythmien im Schwingungsablauf auf, doch weitaus seltener und mit etwa gleicher Amplitude.

ERGEBNISSE BEI TUMOREN DER STIMMLIPPEN

Bei den Tumoren der Stimmlippen (es handelt sich durchwegs um Malignome) waren die Bilder erwartungsgemäß von der Lage des Tumors und seiner Ausdehnung abhängig.

Sind die Stimmlippen nur geringflächig befallen, so ist die schnelle phonatorische Glottographie von ganz besonderem Interesse. Es ergeben sich verhältnismäßig kleine Schwingungen, die in ihrem Bewegungsablauf das Phänomen der Schwebung zeigen. Die abgebildete Photographie zeigt die Glottographie bei einem kleinknotigen Carcinom bei einem Patienten von 67 Jahren. Der Kranke sprach bei der Aufnahme den Vokal A. Die rechnerische Lösung ergab eine Frequenz von 580 Hz und eine zweite Frequenz von 480 Hz. Die Schwebung war 100/sec. Die hohe Schwingungszahl ist eine Folge der relativen Verkürzung der Stimmlippen, denn nach diesem Befund muß angenommen werden, daß der gesunde Anteil unabhängig vom kranken Anteil des Stimmbandes schwingt, wobei beide ihre Eigenfrequenz halten. Da der Tumorbefall mit einer Massenverfestigung und Verdichtung einhergeht, entsprechen die langsamen Schwingungen den befallenen Teil der Stimmlippen. Die hohe Frequenz ist der Bewegungsablauf des gesunden Gewebes, das durch den Ausfall der pathologischen Hälfte verkürzt ist.

Die Schwebung selbst ist unrein, d.h. die Amplitude der Schwebung geht nicht auf 0 herunter. Eine solche Art von Schwebung liegt vor, wenn die beiden Schwingungen verschiedene Amplituden haben.

Dieser Ablauf kann ganz i.S. von BERENDES als Beweis gegen die Theorie von HUSSON angewandt werden.

BERENDES führt die Stimmbandschwingungen paramedian fixierter Stimmbänder als Argument gegen die neurochronaxische Theorie HUSSONS an. Unter Befund zeigt, daß ein Tumorgewebe in diesem Falle noch weitgehend abkapselt und vor allem nicht zu groß, ebenfalls eigenständige Schwingungen ausführen kann und außer des Luftstromes keinerlei Anstoßes bedarf. Der normale Stimmlippenabschnitt schwingt ebenfalls für sich und überträgt die Frequenz nicht auf das pathologische Gewebe, denn ein solches Mitnehmen müßte zu einer Frequenzsteigerung des erkrankten Teiles führen und damit zur Abnahme der Schwebungen.

Wir können dies nicht beobachten.

Bei größerem Tumorbefall, wie er hauptsächlich zur Verfügung steht, war in der phonatorischen Glottographie keine Periodizität mehr zu erkennen. Die Schwingungen sind vollkommen arrhythmisch. Gelegentlich unterliegen Amplitude und Frequenz einem periodischen An- und Abschwellen. Es schwingen hier alle Teile der befallenen Stimmlippe



Phonatorisches Glottogramm bei Phonation des Vokales A und einseitigem Stimmband-Ca.

für sich und nur bei dem Nähern der gesunden Seite nimmt die Amplitude etwas zu. Die Ausschläge sind entsprechend klein.

Die respiratorische Glottographie ist unauffällig. Der Unterschied zwischen lautem und leisem Sprechen beruht hauptsächlich in der Zunahme der hohen Frequenz, während die niedrigen Schwingungen weitgehend gleich bleiben.

Die Luftschwingungen treten beim harten Stimmeinsatz sofort mit den Stimmlippenbewegungen auf. Die letzteren sind anfangs verhältnismäßig groß, ebbten aber nach kurzer Zeit ab. Der Verlauf der tiefen Luftschwingungen ist ähnlich, in dem auch hier mit dem Abklingen der Stimmlippenbewegungen die Amplitude kleiner wird. Die Frequenz wird unregelmäßig. Die hohen Frequenzen sind davon weniger betroffen, sie halten ihre Höhe, die sie sofort nach dem Sprachbeginn erreichen. Der Dämpfungsfaktor im hohen Bereich ist wie beim normalen Stimmband.

LEE-PHÄNOMEN

Im Jahre 1950 veröffentlichte LEE seine Beobachtungen über das Verhalten der Sprache bei verzögertem Wiederangebot des gesprochenen Wortes an das Ohr. Das Phänomen wurde nach ihm Lee-Effekt genannt. Das Prinzip der Versuchsanordnung ist sehr einfach. Die Vp spricht auf ein Tonband, das einen zweiten Tonkopf besitzt. Von diesem zweiten Tonkopf werden die gesprochenen Worte wieder aufgenommen und dem Ohr des Probanden erneut zugeführt. Der Abstand des ersten Tonkopfes zum zweiten ist verstellbar und somit die Zeit zwischen Aufnahme und Wiedergabe regulierbar. Die Vp hört ihre eigene Sprache mittels schalldichter Kopfhörer, die jeden weiteren Kontakt zur Umwelt ausschließt, mit einer Verzögerung wieder.

Die Folge ist eine Sprachstörung und eine Herabsetzung der psychischen Leistung. Der Proband erleidet eine Beeinträchtigung, die alle Akzente der Sprache betrifft und mit Iterationen einhergeht. Die Sprache wird langsamer und gedehnter. Es fällt eine Armut an Zäsuren auf und eine starke Monotonie. Besonders schwierig auszusprechende Worte sind Doppelsilben wie Papa, Mamakind usw. Die Lautstärke erfährt eine Steigerung. MEYER-EPPLER beschreibt bei seinen Untersuchungen der Frequenz auch ein Ansteigen der Tonhöhe. Die Wortfindung ist gestört. Die Erscheinung gleicht einem Stottern mit Polterkomponente, jedoch ist kein Pressen zu sehen. Das Vegetativum reagiert mit einer starken inneren Unruhe und vermehrter Transpiration. Die Mimik ist verändert. Im psychischen Gebiet ist die Denkfähigkeit eingeschränkt und die Logik mangelt. Die Probanden geraten in eine aggressive Verfassung, die sich unter anderem in unkontrollierten Ausdrücken zeigt.

Indolente Vp zeigen im allgemeinen die Störungen weit weniger ausgeprägt als interessierte und geistig regsame Menschen.

Die normale Sprache beginnt zunächst mit einem Schließen der Glottis und dem Auftreten der Luftschwingungen, sobald der nötige Schließungszustand erreicht ist, und verläuft zunächst vollkommen unauffällig. Erreicht das gesprochene Wort wieder das Ohr der Vp, so tritt eine abrupte Öffnung der Glottis auf und ein ebensolches Ende der Luftschwingungen. Die phonatorische Glottographie verläuft ebenso. Nach einer kurzen Pause beginnt wieder eine normale Phonation um gleichfalls wieder abrupt zu enden. Der Abfall der einzelnen Frequenzbereiche, die vom Filterverstärker getrennt geliefert werden, verläuft in den hohen Bereichen nahezu vertikal, in den niedrigen Lagen etwas flacher.

Beim Singen ist das Bild gleich.

Wird die phonatorische Glottographie mit einer schnellen Geschwindigkeit geschrieben, so erscheinen zunächst sinusförmige Schwingungen,

die plötzlich unterbrochen werden. Es treten kleinste Ausschläge auf, die sehr unregelmäßig sind und nach einer gewissen Zeit wieder in Sinuskurven übergehen.

Das Lachen gelingt den meisten Vp und ihr Glottogramm gleicht dem des Normalen. Eine Zeituntersuchung der aufgezeichneten Kurve zeigt, daß der Proband sich der Verzögerungszeit anpaßt und seine Lachstöße mit einer solchen Frequenz von sich gibt, daß der dem Ohr angebotene vorhergehende Lachstoß mit dem eben erfolgten Lachton zusammenfällt.

Die Mitbeteiligung des Vegetativums und des Psychischen sprechen gegen einen reinen cochleorecurrentiellen Reflex, wie man das glottographische Verhalten sehr leicht deuten könnte. Es müssen aber corticale und subcortical Zentren mit eingeschaltet sein.

Über subcortical Zentren der Sprache ist bis jetzt noch nicht sehr viel bekannt. Bei Erkrankungen höherer Gebiete, wie des Corpus striatum, treten in den an der Stimmgebung beteiligten Muskeln Hypo- oder Hyperkinesen auf, so daß Störungen in der Stimmlippenbewegung mit dem Kehlkopfspiegel zu sehen sind. Bei unseren Untersuchungen sind aber keinerlei Hypo- oder Hyperkinesen zu erkennen, so daß der Einfluß auf diese Zentren nicht sehr groß sein kann.

Wichtiger ist der Subthalamus, der psychische Vorgänge auf körperliche Funktionen einwirken läßt. In unserem Falle werden körperliche Störungen vom Vegetativum registriert.

Der abrupte Zusammenbruch der Schwingungen des Stimmbandes ist eine Folge des plötzlichen Spannungsverlustes. Für die normale Schwingung besteht eine rücktreibende Kraft, welche der Elongation proportional zunimmt und rückgerichtet ist. Diese Kraft ergibt sich aus der Straffheit der Stimmlippen. Mit dem Zusammenbruch der Innervation, welche durch die Störung hervorgerufen wird, verliert das Stimmband seine Festigkeit und damit die elastische Eigenschaft. Die rücktreibende Kraft und mit ihr die Beschleunigung, welche gleichfalls der Elongation proportional ist, ist auf ein Minimum herabgesetzt und die Schwingung kommt zum Erliegen.

Der Dämpfungsfaktor ist zuerst normal und liegt im Bereich von 0.025 / msec. Im Augenblick der Störung steigt er stark an und die Schwingungsweite nimmt entsprechend ab. In den hohen Frequenzen ist die Zunahme so stark, daß die folgende Amplitude fast Null erreicht.

Der Dämpfungsfaktor ist dem Reibungskoeffizienten, welcher zusammen mit der Geschwindigkeit einer Bewegung die Reibungskraft bestimmt, direkt proportional. Der Proportionalitätsfaktor ist $1/2 m$. m ist die schwingende Masse.

Der Reibungskoeffizient ergibt sich aus der Verfestigung des Gewebes.

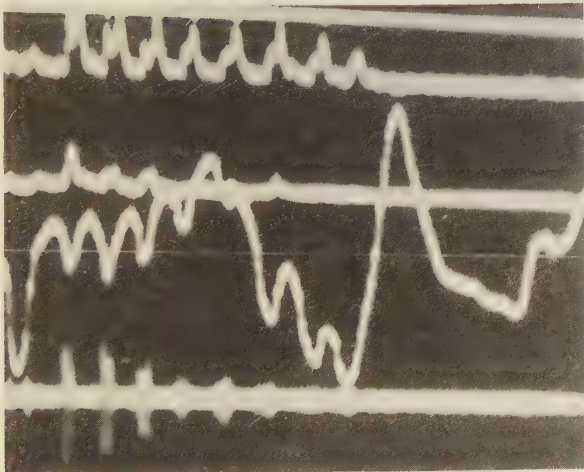
Je geordneter und straffer die schwingende Masse, desto kleiner die Reibungskraft. Im Falle des Lee-Effektes bricht mit der Innervation des Stimmbandes auch die funktionelle Einstellung des Ansatzrohres zusammen. Es liegt hier eine nervöse Störung vor. Es war uns nicht möglich Phasenverschiebungen zu messen, doch besteht wohl kein Zweifel, daß jegliche Resonanzerscheinung erlischt. Der Verlust der Resonanz dürfte wohl auf einem Nachlassen der Spannung im Gewebe des Ansatztones beruhen. Die Folge ist eine große Zunahme der Reibungskraft und damit der Dämpfung. Mit der Beendigung dieser nervösen Störung stellt sich das Ansatzrohr sofort wieder zur Resonanz ein und der Dämpfungsfaktor liegt wieder im normalen Bereich.

300 - 600 Hz

50 - 150 Hz

respiratorische
Glottographie

phonatorische
Glottographie



Respiratorisches Glottogramm bei Lee-Phänomen



1250-1600 Hz

600 - 900 Hz

300 - 600 Hz

50 - 150 Hz

phonatorische
Glottographie

Phonatonisches Glottogramm bei Lee-Phänomen

DISKUSSION

Glottographie

Mit der Glottographie verfügen wir über eine Methode, die uns sehr genau auch die schnellsten Vorgänge in den Bewegungen der Stimmlippen verfolgen läßt und die vor allem in keiner Weise den Phonationsvorgang hemmt oder verändert. Für die zu untersuchende Person ist die Aufzeichnung der Glottographie mit keinen unangenehmen Manipulationen verbunden. Sie ist in ihren Sprechversuchen nicht behindert. Die einzige Forderung, die an die Versuchsperson gestellt werden muß, ist, den Kopf während der Untersuchung möglichst ruhig zu halten. Auch die Bedienung des Gerätes ist sehr einfach und die ganze Untersuchung kann von einer Person durchgeführt werden.

Die Glottographie wurde bei ihrer Einführung hier in München sehr skeptisch betrachtet und immer wieder wurde der Vorwand gebracht, die Glottographie zeige irgendwelche Stromflüsse im Halsgebiet an, die sich zu den Bewegungen der Stimmlippen addieren könnten. Um diesen Einwand zu widerlegen, haben wir neben der Glottographie noch die Diaphanoskopie gleichzeitig abgeleitet. Wie bereits oben dargelegt, zeigen Diaphanoskopie und Glottographie genau synchron die gleichen Bewegungsabläufe der Stimmlippen an. Zur weiteren Widerlegung haben wir mittels Laryngoskopie den Kehlkopf fotografiert und die Auslösung des Blitzes auf dem Sichtbildgerät markiert. So konnten wir zeigen, daß die Glottographie sehr genau Öffnung und Schließung der Glottis anzeigt. Ein weiterer Beweis ist die Glottographie bei frisch exstirpierten Kehlköpfen, deren Stimmritze mittels Fäden geöffnet und geschlossen werden.

Bei all diesen Versuchen sehen wir immer eine exakte Anzeige der Bewegungen der Stimmlippen und glauben aus diesem Grund, daß die Glottographie eine sehr genaue und brauchbare Untersuchungsmethode ist.

Eine weitere Forderung zur wahrheitsgemäßen Aufzeichnung der Schwingungen der Stimmlippen ist die gleichmäßige Felddichte innerhalb des elektrischen Feldes. Um dies zu prüfen, haben wir eine kleine Elektrode von 2.5 qmm Durchmesser in das elektrische Feld zwischen den beiden Stimmlippen gebracht und die Spannungsänderung beim Verschieben der Elektrode innerhalb der Stimmritze gemessen. Die Spannungsänderung war völlig unabhängig von der Stellung der Elektrode und immer gleich. Wir glauben damit bewiesen zu haben, daß die elektrische Felddichte auf jeder Höhe der Stimmritze gleich ist und die Schwingung der Stimmlippen linear vergrößert wiedergegeben wird.

Hermannsche und Helmholtzsche Theorie

Die Ergebnisse der Glottographie bei der Phonation von Vokalen erlauben uns, zu der alten Streitfrage nach der Entstehung der Vokale Stellung zu nehmen. Es haben sich hier besonders in früheren Zeiten die Resonanztheorie von HELMHOLTZ und die HERMANNsche Theorie, von ihm selbst Anblasetheorie genannt, hart gegenüber gestanden. Heute wird der Unterschied nicht mehr so krass gesehen.

Die HELMHOLTZsche Theorie besagt, daß die Luftschwingungen, die das System Stimmbänder und Ausatemstrom liefert, für die Lufträume des Ansatzrohres die erregende Schwingung ist und diese nach den Gesetzen der Resonanz zur Schwingung bringt.

HERMANN hingegen verneint die primären Luftschwingungen, welche die Stimmritze verlassen, den von HELMHOLTZ behaupteten Verlauf und lehnt eine Resonanz im Ansatzrohr ab. Er glaubt vielmehr, daß der Luftstrom periodisch den Luftraum wie in einer Lippenpfeife zum Schwingen bringt.

F. und W. TRENDLENBURG haben bei ihren Stimmanalysen Gruppen hochfrequenter Schwingungen, die sie als selbsterregte Schwingungen im Raum über der Stimmritze deuteten, gefunden. Die so erzeugten Schwingungen müßten streng periodisch sein und mit den Bewegungen der Stimmlippen zusammenfallen. LULLIES hat mittels Pfeifen mit aufschlagenden metallischen Zungen gezeigt, daß eine Erzeugung eines Tones über der Tonritze möglich ist. Danach könnte man die periodischen Vorgänge im Luftraum als Schwingungen auffassen, die durch einen Luftstoß im Augenblick der Öffnung oder der Schließung der Stimmlippen entstehen. Die genaue zeitliche Untersuchung ergibt aber, daß die Schwingungen im Luftraum gerade dann einsetzen, wenn die größte Öffnung der Stimmritzen besteht.

Wir haben diese Ergebnisse bei unseren Untersuchungen bestätigt gefunden. Die hohen Frequenzen beginnen jeweils beim Zeitpunkt der größten Öffnung und haben gegenüber der tiefen Frequenz eine Phasendifferenz von ungefähr π . Bei gleicher Verstärkung ist die Amplitude der direkten Analyse des Glottogrammes in den hohen Frequenzen kleiner als bei der Stimmanalyse, was wir als reine Resonanzerscheinung deuten. Auch die Phasenverschiebung spricht für diese Tatsache. Die Dämpfung ist jedoch verhältnismäßig hoch, das logarithmische Dekrement haben wir in den Grenzen von 0.020 bis 0.040 berechnet. Das logarithmische Dekrement ist das Produkt aus Dämpfungsfaktor und Schwingungsdauer. Entsprechend der geringen Schwingungsdauer ist der Dämpfungsfaktor ziemlich hoch. Dennoch dürfte an der Richtigkeit der Resonanztheorie kein Zweifel bestehen, nachdem es uns ge-

lungen ist, zu zeigen, daß in den Bewegungen der Stimmlippen bereits höherfrequente Schwingungen, die in der Frequenz den Schwingungen des endgültigen Tones nahekommen, vorhanden sind. Unsere Methode erlaubt uns auch die Feststellung, daß die feinsten Bewegungsabläufe bei den verschiedenen Tonlagen sehr verschiedenartig aussehen.

Neurochronaxische Theorie von Husson

Im Jahre 1951 hat der Franzose HUSSON die klassische myoelastische Theorie der Entstehung der Stimmbandschwingungen in Frage gestellt und ihr seine neuromuskuläre Theorie entgegengestellt. HUSSON glaubt, daß sich mit der alten Theorie verschiedene Tatsachen nicht erklären lassen, wie z. B. die geringe Spannung der Stimmlippen im Falsett oder die unveränderte Tongrenze bei Hypotonie der Stimmbänder. Dazu kommt noch seine Beobachtung, daß bei einseitig einem Ohr angebotenem Schallreiz die Amplitude der homolateralen Stimmlippenschwingung größer wird; ein Versuch, der aber von anderen Autoren bis heute nicht reproduziert werden konnte. HUSSON vertritt auf Grund dieser Beobachtungen die Auffassung, daß dem M. thyreoarytaenoideus die jeweilige Frequenz durch entsprechende Nervenimpulse zugeführt wird und es zu einer Kontraktionsfolge entsprechend den Impulsen, und zwar Impuls für Impuls, kommt.

Diese neurochronaxische Theorie war in dieser Form allein von der physiologischen Seite her unannehmbar und mußte erst einige Ergänzungen erfahren, um der Physiologie der Muskelkontraktionen gerecht zu werden.

Die Refraktärzeit der Nervenfasern beträgt etwa 2 msec., d. h. die höchst erreichbare Frequenz der Impulse in einem Nerven liegt bei 500 Hz. Bei höherfrequenten Schwingungen der Stimmlippen könnte nach der Anschauung HUSSON nur ein Teil der Stimmbänder erregt werden, doch würde es durch die Interferenz der einzelnen Muskelfasern zu einem geschlossenen Schwingen der Gesamtheit der Fasern in der ergebenden Frequenz kommen.

Zur weiteren Untersuchung dieser Theorie war zuerst die Frage zu klären, ob sich in den Kehlkopfnnerven bei der Phonation Nervenimpulse in der Frequenz des Tones nachweisen lassen. O. LINDEMANN hat nun tatsächlich bei Versuchen am Hund im N. laryngicus caudalis Aktionsströme nachgewiesen, die in ihrer Frequenz der des Tones gleichkommen. Nach Durchtrennung des Nerven waren sie auch vom zentralen Nervenstumpf abzuleiten. Wird jedoch der N. laryngicus cranialis

durchschnitten, so schwinden die Impulse auf der Seite der Durchtrennung, was LINDEMANN veranlaßt hat, diese Erscheinung als propriozeptiven Reflex zu deuten. Es handelt sich also nicht um einen zentralen Ursprung der Nervenerrregung.

Eine zweite Schwierigkeit ist die impulsgerechte Kontraktion der Stimmlippen im normalen Tonhöhenbereich der Stimme.

LAGET schließt aus seinen Versuchen am Hund auf eine Tetanusfrequenz von 300 Hz. Es gehören also die Kehlkopfmuskeln zu den besonders schnellen Muskeln und dementsprechend liegt auch die Tetanusgrenze hoch, doch ist zu berücksichtigen, daß im Tetanusbereich die Amplituden sehr klein werden und daher gerade ab 300 Hz kein Muskelton zu erwarten ist.

HAST konnte bei einer Stimulation des Nervus recurrens synchrone Fibrillationen der Stimmlippen bis zu 50 Hz erreichen. Bei 60 Hz folgen die Stimmlippen jedoch nicht mehr dem Reiz.

AMENBACH hat beim Hund mittels Nadelelektroden aus den Stimmbandmuskeln Potentiale abgeleitet und hat beim Phonieren eine Aktionsstromfolge von etwa 50 Hz gefunden.

Wir glauben, nach unseren Befunden die myoelastische Theorie weiter stützen zu können.

Die Aufteilung der Kraft der Muskelfasern in den Stimmbändern in ihre Komponenten ergibt eine Hauptkomponente, die rein sagittal liegt, während die senkrecht zu ihr stehende Kraft äußerst klein bleibt. Gerade diese kleine Kraft müßte aber die Kontraktion und die Bewegung senkrecht zum Luftstrom bewerkstelligen, wozu sie nach ihrer kleinen Größe kaum in der Lage sein dürfte. Die dorsoventrale Komponente dagegen ist für die Spannungs- und damit auch die Elastizitätsveränderung von größter Bedeutung. Nach unseren Befunden bei der normalen Sprache läuft die Schwingung der Stimmlippen ähnlich der einer Saite, welche in ihrem sinusförmigen Verlauf von ihrer Elastizität und einer damit verbundenen rücktreibenden Kräften bestimmt wird, ab. Bei einer Kontraktion der Muskelfasern im Augenblick des größten Ausschlages verlief die Kurve steiler und begänne mit einer spitzen Umkehr, ähnlich einer Dreieckskurve. Die größte Kraftwirkung auf die Stimmlippen bestände in beiden Fällen im Augenblick π , doch wäre die rücktreibende Kraft bei einer Kontraktion neben der Spannung des Muskels, die ihm durch die Dehnung auf jeden Fall innewohnt, eine Folge der isotonischen Kontraktion. Da diese Kraft größer wäre, müßte auch die Beschleunigung höher sein und der Ablauf infolgedessen steiler und rascher erfolgen.

Wir können zeigen, daß auch tumoröses Gewebe, welches nicht innerviert wird, zu regelmäßigen Schwingungen gebracht werden kann. Es sei besonders auf die Schwebungen hingewiesen, die ein vollkommen unabhängiges und selbständiges Bewegen des pathologischen Gewebes ergeben hat. Bei einer reinen Kontraktion müßte der kranke Teil des

Stimmbandes im Schwingungsablauf ausfallen oder zu mindest erst langsam von dem normal schwingenden Teil in Gang gebracht und mitgenommen werden. Dies ist jedoch nicht der Fall.

Die gelähmten Stimmlippen können durch eine nervöse Aktion nicht zur Bewegung gebracht werden. Sie müßten infolgedessen für die Phonation gänzlich ausfallen. Unsere Bilder widerlegen diese Vermutung und zeigen anschaulich die Abhängigkeit der Phonation von einer Ausgangsspannung, die auch von außen an den Stimmbändern erzeugt werden kann.

Alle diese Befunde sprechen gegen die neurochronaxische Theorie von HUSSON.

Herrn Dr. E. LOEBELL, Leiter der Stimm- und Sprachabteilung an der Hals-, Nasen- und Ohrenklinik der Universität München, bin ich zu größtem Dank verpflichtet für die Stellung des Themas und seine ständige Hilfe und Führung in Rat und Tat.

Weiter bin ich zu Dank verpflichtet Herrn Prof. Dr. A. HERMANN, Direktor der Klinik und Poliklinik für Hals-, Nasen- und Ohrenleiden an der Universität München, für die Arbeitsmöglichkeit in seiner Klinik.

Mein Dank gebührt auch Frau Dr. G. FULL-SCHARRER für ihre freundliche Hilfe bei der Auswahl der Patienten.

LITERATURVERZEICHNIS

- Barth, E.: Einführung in die Physiologie, Pathologie und Hygiene der menschlichen Stimme.
Leipzig 1911.
- Brachett, J. P.:
Ann. Otol. Rhinol. Laryng. 57 556-559.
- Buchthal, M.: Journ. exper. Physiolog. XLIV 137.
- Clara, M.: Das Nervensystem des Menschen (1959).
- Ewald, J. R.: Zur Physiologie des Kehlkopfes und der Luftröhre.
P. Heymanns, der Laryngologie und Rhinologie
Bd. I (1898).
- Ewald, J. R.: Zur Kenntnis von Polsterpfeifen.
Pflügers Archiv 152, 171 (1913).
- Faaborg-Andersen:
Acta Physiolog. scandin.
- Faaborg-Andersen:
EM Investigation of intrinsic laryngeal muscles in human
Acta Physiolog. scandin. 41 140 (1957).
- Fabre, Ph.: Annales d. oto-laryng. 75 No. 1, 2 767.
- Fabre, Ph.: Annales d. oto-laryng. 78 No. 12, 814-824.
- Fabre, Ph.: Extrait des Comptes des seances de l'Academie des
Sciences, 254 4354-56 (1962).
- Gauthier-Willain:
Extrait des Comptes des seances de l'Academie des
Sciences, 248 3041-42 (1959).
- Gierke, H. v.: Über die mit dem Mund hervorgebrachten Pfeiftöne.
Pflügers Archiv 249 (1949).
- Goerttler, K.: Die Anordnung, Histologie und Histogenese der querge-
streiften Muskulatur im menschlichen Stimmband.
Z. f. Anat. 115 (1952).
- Grützmaker, M.:
Die Verwendung der Tonhöhenschreiber bei mathemati-
schen, phonetischen und musikalischen Aufgaben.
Akust. Zeit. 3 183 (1937).

- Gutzmann, H. und A. Loewy:
Über den intrapulmonalen Druck und den Luftverbrauch
bei der normalen Atmung, bei phonetischen Vorgängen
und bei der expiratorischen Dyspnoe.
Pflügers Archiv 180 111 (1920).
- Helmholtz, H. v.:
Die Lehre von den Tonempfindungen (1913).
- Hermann, L. Ü.:
Über das Verhalten der Vokale am neuen Edisonschen
Phonographen.
Pflügers Archiv 47 42 (1890).
- Hermann, L. Ü.:
Phonographische Untersuchungen, I. Mitt.
Pflügers Archiv 45 582 (1889).
- Hermann, L. Ü.:
Phonographische Untersuchungen, II. Mitt.
Pflügers Archiv 47 44 (1890).
- Hermann, L. Ü.:
Phonographische Untersuchungen, III. Mitt.
Pflügers Archiv 47 347 (1890).
- Hermann, L. Ü.:
Weitere Untersuchungen über das Wesen der Vokale.
Pflügers Archiv 61 169 (1895).
- Hermann, L. Ü.:
Über Synthese von Vokalen.
Pflügers Archiv 83 1 (1901).
- Hermann, L. Ü.:
Neue Beiträge zur Lehre von Vokalen und ihrer Entstehung.
Pflügers Archiv 141 1 (1911).
- Hofer, G.:
Zur motorischen Innervation des menschlichen Kehlkopfes.
Mschr. Ohrenheilk. 81 57 (1947).
- Husson, R.:
Sur la physiologie vocale.
Ann. d'Oto.-Laryng. 2 1241 (1952).
- Husson, R. et Tarneaud, I.:
La mecanique des cordes vocales dans la phonation.
Rev. d. Laryng. etc. 53 961 (1952).

- Husson, R.: Etude des phenomenes physiologiques et aconstiquer
fondamentanx de la coix chantee (1950).
- Kagen, B. und Luchsinger, R.:
Bemerkungen zur neuromuskulären Theorie Hussons.
Folia phoniatr. 5 46 (1953).
- Katsuki, J.: The funstion of the phonatory musles.
Japan. Journ. Physiolog. 1 1 (1950).
- Kerpola, W. und Walle, D.S.:
Über die Genauigkeit eines nachgesungenen Tones.
Scand. Arch. Physiol. 33 1 (1915).
- Luchsinger, R.:
Untersuchungen über die Klangfarbe der menschlichen
Stimme.
Archiv Sprach- und Stimmheilk. 6 1 (1942).
- Luchsinger, R.:
Schalldruck- und Geschwindigkeitsregistrierung der
Atemluft beim Singen.
Fol. phoniatr. 3 25 (1951).
- Luchsinger, R. und Arnold, H.:
Lehrbuch der Stimm- und Sprachheilkunde (1949).
- Mayet, A. und Muendnich, K.:
Beitrag zur Anatomie und zur Funktion des M. crico-
thyreoideus und der Crocothyreoidgelenke.
Acta anat. 33 273 (1958).
- Müller, E.: Stimmphysiologische Untersuchungen an einem Kehl-
kopfmodell.
Archiv Sprach- und Stimmphysiologie 2 (1938).
- Musehold, H.: Stroboskopie und photographische Studien über die
Stellung der Stimmlippen im Brust- und Falsettregister.
Archiv f. Laryng. 7 (1898).
- Nadoleczny, M.: Physiologie der Stimme und Sprache.
Dehnker-Kahlers Handbuch der HNO-Heilkunde,
Bd. I (1925).
- Oertel, M.J.: Das Laryngoskop und die laryngoskopische Untersu-
chung.
Arch. f. Laryng. 3 (1895).
- Pielke, W.: Über offen und gedekct gesungene Vokale.
Passow-Schäfers Beitr. 5.

- Pressmann, J.: Physiology of the vocal cords in phonation and respiration.
Arch. of Otolaryng. 35 (1942).
- Ranke, O. und Lullies, H.:
Gehör, Stimme, Sprache (1953).
- Schilling, R.: Der M. sternothyreoideus und seine stimmphysiologische Bedeutung.
Arch. Sprach- und Stimmheilkunde 1 (1937).
- Schilling, R.: Über den Mechanismus der Spannung der Stimmlippen.
HNO-Arzt I 31 (1931).
- Sokolowsky, R.: Untersuchungen über das Wesen der Vokale.
Z. HNO-Heilkunde 6 (1923).
- Sonnesson, L.: Laryngo-diaphanoscopy.
Kongreßmitteilung 1964 Mailand.
- Sonninen, A.: The role of the external laryngeal muscles in length adjustment of the vocal cords in singing.
Acta Oto-Laryng. Suppl. 130 (1956).
- Sunder Plassman, P.:
Über den Nervenapparat des M. vocalis.
Z. HNO-Heilkunde 32 (1933).
- Tarnoczy, T.: The opening quotient of the vocal cords during phonation.
J. Acoust. Soc. Amer. 23 (1951).
- Töndury, G.: Angewandte und topographische Anatomie des Menschen (1959).
- Trendelenburg, F.:
Objektive Messung und subjektive Beobachtung von Schallvorgängen.
Naturwiss. 19 (1931).
- Trendelenburg, F. und Franz, E.:
Sprachuntersuchungen mit Siebkette und Oszillograph.
Wissen. Veröffentl. d. Siemens Werke 15 (1936).
- Trendelenburg, F. und Trendelenburg, W.:
Über die Ermittlung d. Verschußzeit d. Stimmritze aus Klangfarbe.

Trendelenburg, W.:

Physiologische Untersuchungen über Stimmklangbildung.
Sitzungsbericht preuß. Akad. Wiss. 1935 Nr.31.

Trendelenburg, W.:

Zur Kenntnis des Vokaleinsatzes und des Glottisschlages.

Sitzungsbericht preuß. Akad. Wiss. Nr.13.

Wustrow:

EMG des M.vocalis.

Kongreßmitteilung 1964 Mailand.

Zenker, W.:

Über Bindegewebsstrukturen des Kehlkopfes und seines Aufhängeapparates und deren funktionelle Bedeutung für den Kehlkopf.

Mschr. Ohrenheilkunde 92 (1958).

Zenker, W. und Glaninger, J.D.:

Die Stärke des Trachealzuges beim lebenden Menschen und seine Bedeutung für die Kehlkopfmechanik.

Z. Biol. 111 (1959).

LEBENS LAUF

Ich, Horst Bürger, wurde am 29. Februar 1940 als Sohn des Berufssoldaten Kurt Bürger und seiner Ehefrau, Dominika Bürger, geborene Nägelin, in Augsburg geboren. Nach einem fünfjährigen Besuch der Volksschule trat ich am 4. September 1951 in das Humanische Gymnasium bei St. Stephan in Augsburg ein. Im Juli 1960 legte ich dort die Reifeprüfung ab.

Im September und Oktober 1960 war ich an der Hessing'schen Heilanstalt für Orthopädie als Krankenpfleger tätig. Im November 1960 begann ich an der Universität München das Studium der Medizin. Das Vorphysikum legte ich im Oktober 1961, das Physikum im Februar 1963 in München ab.

Während des klinischen Teils meines Studiums, den ich ebenfalls an der Universität München verbrachte, habe ich in der Chirurgischen Klinik in Augsburg und HNO-Klinik der Universität München famuliert.

Vom April bis August 1966 legte ich an der Ludwig-Maximilians-Universität in München die ärztliche Prüfung ab. Seit 1. Oktober 1966 bin ich an der Prosektur der Stadt Augsburg als Medizinalassistent angestellt.

